

# Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

## Simulació del sistema elèctric de potència de Mallorca

### MEMÒRIA

24 de juny de 2019

**Autor:** Rosa Gil Garcia  
**Director:** Eduardo Prieto Araujo  
**Convocatòria:** 06/2019



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



# ETSEIB



## Resum

Aquest projecte és un anàlisi del Sistema Elèctric de potència de l'illa de Mallorca on es compara la situació actual amb un escenari futur. En aquesta escenari, es desconnecta una de les centrals, la de Es Murterar, i es substitueix per un nou enllaç HVDC. S'ha elegit aquest segon sistema arrel d'un darrer darrer acord del Govern de les Illes Balears on es planteja el tancament progressiu de la central de Es Murterar i la planificació d'un segon enllaç elèctric entre la Península i Mallorca.

Per a realitzar aquest projecte, s'han estudiat i modelat les principals centrals termoelèctriques de l'illa juntament amb els elements de control necessaris per assegurar la cobertura de la demanda elèctrica permanentment. A més, també s'ha treballat amb tecnologies HVDC, ja que una de les parts importants del Sistema Elèctric de Mallorca és la interconnexió península-Mallorca, un projecte que es va dur a terme fa uns anys i va ser pioner a nivell nacional.

Cada un d'aquests elements, s'ha estudiat, modelitzat i controlat per separat per tal de poder entendre bé el seu comportament, definir els paràmetres i dissenyar el control de cada un d'ells. Una vegada s'han tingut tots els models funcionant, s'han generat dos escenaris globals, dels quals s'ha estudiat el comportament de la freqüència i de les potències generades per les diferents unitats davant de diferents pertorbacions.





## Abstract

This project is an analysis of the Mallorca's power system, in the document it is compared the current situation with a hypothetical one. In this case, the system of Es Murterar is going to be replaced by a VSC. This decision had been taken by the Govern de les Illes Balears, where it was raised the option of closing the central at issue.

To carry out this project, the main thermoelectric power plants of the island had been studied and modelled together with the necessary control elements to ensure the coverage of the electric demand permanently. In addition, in the project there is a part that it had been done in VSC converter, because one of the most important part of the Mallorca's electric system is the interconnection between the mainland and the island. That project was carried out few years ago being pioneer in the country.

On the other hand, each of these elements had been studied, modelled and controlled separately to understand the behaviour and to define the parameter of all of them. Once it is known that all the models are working in the right way, it had been designed two different global system, where the frequency and the power generated by the different units, had been studied against different disturbances.



# Índex

<b>Resum</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Glossari</b>	<b>12</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>15</b>
1.1 Motivació del projecte . . . . .	15
1.2 Objectius del projecte . . . . .	15
1.3 Abast del projecte . . . . .	15
<b>2 Elements principals del sistema</b>	<b>17</b>
2.1 Introducció . . . . .	17
2.2 Centrals tèrmiques . . . . .	17
2.2.1 Son Reus . . . . .	18
2.2.2 Cas Tresorer . . . . .	18
2.2.3 Es Murterar . . . . .	18
2.3 Interconnexió Península-Mallorca . . . . .	18
2.4 Convertidor CC/CA . . . . .	20
<b>3 Modelització del sistema elèctric de potència de Mallorca</b>	<b>21</b>
3.1 Introducció . . . . .	21
3.2 Modelització de les centrals tèrmiques . . . . .	21
3.3 Modelització del convertidor VSC . . . . .	24
3.4 Model de les línies CA . . . . .	25
3.5 Càrregues de demanda . . . . .	27
<b>4 Control del sistema elèctric de potencia de Mallorca</b>	<b>29</b>
4.1 Introducció . . . . .	29
4.2 Control de les turbines a les centrals tèrmiques . . . . .	29
4.2.1 Control primari $P_f$ . . . . .	30
4.2.2 Control Secundari $P_f$ . . . . .	35
4.2.3 Paràmetres . . . . .	35
4.3 Control de P i Q a partir del VSC . . . . .	36
4.3.1 Transformada de Clarke . . . . .	36
4.3.2 Transformada de Park . . . . .	37
4.3.3 Equacions del voltatge en el marc de referència síncrona . . . . .	39
4.3.4 Càlcul dels corrents de referència . . . . .	40
4.3.5 Esquema general de control . . . . .	40
4.3.6 Control del llaç de corrent . . . . .	41
4.3.7 Paràmetres del VSC . . . . .	42
<b>5 Primer cas d'estudi: cas actual de la xarxa elèctrica de Mallorca</b>	<b>47</b>
5.1 Canvis de la demanda . . . . .	47
5.2 Canvis de distribució del consum . . . . .	51
5.3 Canvis de distribució de generació . . . . .	56
5.4 Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona . . . . .	57
5.5 Desconnexió de les centrals . . . . .	58

5.6	Canvis en la $k$ del <i>droop</i> . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Segon cas d'estudi: situació hipotètica de la xarxa elèctrica de Mallorca</b>	<b>63</b>
6.1	Canvis de distribució de demanda . . . . .	64
6.2	Canvis de distribució del consum . . . . .	67
6.3	Canvis de distribució de generació . . . . .	71
6.4	Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona . . . . .	72
6.5	Desconnexió de les centrals . . . . .	75
6.6	Canvis en la $k$ del <i>droop</i> . . . . .	78
6.7	Discussió dels resultats i observacions . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>Agraïments</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Pressupost</b>	<b>85</b>
9.1	Cost de material d'oficina . . . . .	85
9.2	Cost de llicències . . . . .	85
9.3	Cost de personal . . . . .	85
9.4	Cost energètic . . . . .	86
9.5	Cost total associat . . . . .	86
<b>10</b>	<b>Impacte ambiental</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Annex</b>	<b>91</b>
A.1	Disseny del convertidor VSC . . . . .	91
A.1.1	PLL . . . . .	91
A.1.2	Current loop . . . . .	92
A.1.3	Controlador <i>droop</i> del VSC . . . . .	93
A.1.4	Transformada de Park . . . . .	93
A.1.5	Antitransformada de Park . . . . .	94
A.2	Disseny de les centrals elèctriques . . . . .	94
A.2.1	Son Reus . . . . .	94
A.2.2	Cas Tresorer . . . . .	95
A.2.3	Es Murterar . . . . .	96

## Índex de figures

1	Esquema del sistema elèctric [10] . . . . .	17
2	Interconnexió entre la Península i Mallorca [6] . . . . .	19
3	Sistema elèctric balear [10] . . . . .	21
4	Exemple modelització central de Son Reus . . . . .	23
5	Modelització de la turbina . . . . .	24
6	Modelització del VSC . . . . .	25
7	Circuit equivalent en $\pi$ d'una línia [1] . . . . .	25
8	Circuit equivalent en $\pi$ d'una línia [5] . . . . .	26
9	Blocs utilitzats per modelar l'equivalent $\pi$ . . . . .	26
10	Altres possible bloc per modelar l'equivalent $\pi$ . . . . .	27

11	Gràfic de la demanda a l'illa de Mallorca [10] . . . . .	27
12	Control turbina [2] . . . . .	31
13	Diagrama turbina [2] . . . . .	31
14	Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de $T_R$ . . . . .	32
15	Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de $T_R$ dins de l'interval desitjat . . . . .	33
16	Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de $K_p$ i $K_i$ . . . . .	33
17	Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de $R$ . . . . .	34
18	Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de $R$ . . . . .	34
19	Representació del pla $\alpha$ - $\beta$ [1] . . . . .	37
20	Representació pla $qd0$ [1] . . . . .	38
21	D'esquerra a dreta: referència $abc$ , $\alpha\beta0$ , $qd0$ . . . . .	39
22	Model equivalent de la part AC del convertidor VSC [1] . . . . .	40
23	Esquema general del control del convertidor [1] . . . . .	41
24	Control del llaç de corrent [1] . . . . .	42
25	Càlcul de la $\tau$ . . . . .	43
26	Tensió $v_{zabc}$ de la part de la xarxa del VSC . . . . .	44
27	Intensitat del VSC . . . . .	44
28	Intensitat en referència $qd0$ del VSC . . . . .	45
29	Potència activa del VSC . . . . .	45
30	Tensió $V_{labc}$ de la part del convertidor VSC . . . . .	46
31	Esquema de la simulació del primer cas . . . . .	47
32	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=600$ MW. . . . .	48
33	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=600$ MW. . . . .	49
34	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=700$ MW. . . . .	49
35	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=700$ MW. . . . .	50
36	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=800$ MW. . . . .	50
37	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=800$ MW. . . . .	51
38	Variació de la potència demanada . . . . .	52
39	Variació de la freqüència al augmentar la demanda . . . . .	53
40	Variació de la potència generada . . . . .	53
41	Variació de la potència demanada . . . . .	54
42	Variació de la freqüència al augmentar la demanda . . . . .	55
43	Variació de la potència generada . . . . .	55
44	Variació de la freqüència al modificar el valor de consigna de la $P_{generada}$ . . . . .	56
45	Variació de la freqüència al modificar el valor de consigna de la $P_{generada}$ . . . . .	56
46	Variació de la potència davant l'increment de la part VSC . . . . .	57
47	Potència subministrada . . . . .	57
48	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus . . . . .	58
49	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus . . . . .	59
50	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer . . . . .	59
51	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer . . . . .	60
52	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Es Murterar . . . . .	60
53	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Es Murterar . . . . .	61
54	$k=0,01$ . . . . .	61
55	$k=0,05$ . . . . .	61
56	$k=0,1$ . . . . .	62
57	$k=0,2$ . . . . .	62
58	Esquema de la simulació del segon cas . . . . .	63

59	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=600$ MW. . . . .	64
60	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=600$ MW. . . . .	65
61	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=700$ MW. . . . .	65
62	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=700$ MW. . . . .	66
63	Variació de la freqüència del sistema quan la $P_{demandada}=800$ MW. . . . .	66
64	Variació de la potència del sistema quan la $P_{demandada}=800$ MW. . . . .	67
65	Variació de la freqüència davant una variació de la demanda. . . . .	68
66	Variació de la demanda del sistema. . . . .	68
67	Variació de la potència subministrada davant una variació de la demanda. . . . .	69
68	Control primari implementat als VSC . . . . .	69
69	Potència demandada . . . . .	70
70	Variació de la freqüència del sistema . . . . .	70
71	Potència generada del sistema . . . . .	71
72	Variació de la freqüència davant una variació de la demanda. . . . .	72
73	Variació de la freqüència davant una variació de la demanda. . . . .	72
74	Increment de la potència subministrada pel VSC1 . . . . .	73
75	Increment de la potència subministrada pel VSC1 . . . . .	74
76	Increment de la potència subministrada pels dos VSC . . . . .	74
77	Increment de la potència subministrada pels dos VSC . . . . .	75
78	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus . . . .	76
79	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus . . . .	76
80	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer . .	77
81	Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer . .	77
82	$k=0,01$ . . . . .	78
83	$k=0,05$ . . . . .	78
84	$k=0,1$ . . . . .	78
85	$k=0,2$ . . . . .	78
86	Disseny del VSC . . . . .	91
87	PLL . . . . .	91
88	Controlador PLL . . . . .	92
89	Current loop . . . . .	92
90	Controlador <i>droop</i> del VSC . . . . .	93
91	Transformada de Park . . . . .	93
92	Antitransformada de Park . . . . .	94
93	Disseny central de Son Reus . . . . .	94
94	Disseny turbina de la central de Son Reus . . . . .	95
95	Disseny central de Cas Tresorer . . . . .	95
96	Disseny turbina de la central de Cas Tresorer . . . . .	96
97	Disseny central de Es Murterar . . . . .	96
98	Disseny turbina de la central de Es Murterar . . . . .	97

## Índex de taules

1	Potència generada situació 1 . . . . .	28
2	Potència generada situació 2 . . . . .	28
3	Període de temps mínim pel qual un mòdul ha de ser capaç de funcionar [9] . . .	29
4	Límits de tensió de la xarxa elèctrica [9] . . . . .	29
5	Ajust del valor de la consigna pel primer cas d'estudi . . . . .	35

6	Ajust del valor de la consigna pel segon cas d'estudi . . . . .	35
7	Paràmetres de la central de Son Reus . . . . .	35
8	Paràmetres de la central de Cas Tresorer . . . . .	36
9	Paràmetres de la central de Es Murterar . . . . .	36
10	Paràmetres del convertidor VSC . . . . .	43
11	Anàlisis realitzats en el primer cas d'estudi . . . . .	47
12	Variació de la demanda . . . . .	48
13	Anàlisis realitzats en el segon cas d'estudi . . . . .	64
14	Variació de la demanda . . . . .	64
15	Casos de increment de la part del VSC . . . . .	73
16	Cost de material d'oficina . . . . .	85
17	Cost de material de llicències . . . . .	85
18	Cost de personal . . . . .	86
19	Cost de energètic . . . . .	86
20	Cost total . . . . .	86





## Glossari

### Acrònims

AC	Alternating Current, Corrent Altern
AT	Alta Tensió
BT	Baixa Tensió
DC	Direct Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
LCC	Line Commutated Converter
MT	Mitja Tensió
PI	Controlador amb acció proporcional i integral
PLL	Phase Locked Loop
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
VSC	Voltage Source Converter

### Símbols

$D1$	Demanda 1
$D2$	Demanda 2
$D3$	Demanda 3
$f_e$	Freqüència del generador
$K_I$	Constant integral del PI
$K_P$	Constant proporcional del PI
$l_l$	Valor de les inductàncies del VSC
$p$	Nombre de pols de la màquina
$P_e$	Potència elèctrica de la màquina síncrona
$P_{ref}$	Potència de referència de la màquina síncrona
$R$	Constant d'estaticisme
$r_l$	Valor de les resistències del VSC
$T_R$	Constant de temps del controlador de la turbina
$V_{ref}$	Tensió d'excitació de referència
$V_l^{abc}$	Tensió en referència abc de la part del convertidor
$V_z^{abc}$	Tensió en referència abc de la part de la xarxa
$x_{abc}$	Vector referència $abc$
$x_{\alpha\beta 0}$	Vector referència $\alpha\beta 0$
$x_{qd0}$	Vector referència $qd0$

### Símbols grecs

$\omega_e$	Velocitat angular del sistema elèctric $\omega_s$
Velocitat de sincronisme	
$\theta$	Angle de la xarxa elèctrica
$\tau$	Constant de temps del controlador PI del VSC

### Subíndexs

$abc$	Referència $abc$
$\alpha\beta 0$	Referència $\alpha\beta 0$
$qd0$	Referència $qd0$

### Superíndexs

*	Valor del senyal de consigna
---	------------------------------





# 1 Introducció

## 1.1 Motivació del projecte

En tot sistema elèctric de potència, amb la finalitat d'operar satisfactòriament, s'ha de mantenir la freqüència pràcticament constant. Per aquest motiu, es indispensable conservar un balanç entre la potència demandada i la generada, ja que la diferència entre aquestes ocasiona problemes que afecten principalment a l'estabilitat de la freqüència. Constantment, la potència produïda ha de ser igual a la demandada més les pèrdues, mantenint d'aquesta forma el valor nominal de la freqüència. En el cas de que no sigui així, quan la potència demandada és major a la generada, la diferència d'energia s'emmagatzema en el rotor provocant una disminució de la velocitat de la màquina i conseqüentment la baixada de la freqüència. En el cas contrari, quan la potència generada és major a la demandada, aquesta diferència d'energia s'emmagatzema en forma d'energia cinètica en els generadors causant una acceleració del sistema i com a conseqüència un augment de la freqüència. Degut a la estreta relació que hi ha entre la potència activa i la freqüència del sistema, es fonamental el control primari i secundari de  $P_f$  [2].

Es considera com a sistema elèctric de potència d'estudi, el Sistema Elèctric de l'illa de Mallorca. En el Capítol 2 es presenten els diferents elements del sistema, a continuació el Capítol 3, exposa els elements modelitzats per a realitzar les simulacions. En el Capítol 4 es presenta tota la teoria i les eines utilitzades pel disseny del control dels diferents elements.

Finalment, als Capítols 5 i 6 es mostren els dos casos estudiats. El primer cas és la simulació del sistema elèctric de potència actual de l'illa, mentre que el segon correspon a una situació hipotètica on es tanca una de les centrals principals del sistema i es substitueix per una interconnexió entre la península i Mallorca.

## 1.2 Objectius del projecte

- Modelar el sistema elèctric de potència de l'illa de Mallorca.
- Dissenyar el control del convertidor VSC.
- Dissenyar i controlar els sistemes de generació de l'illa.
- Simular el sistema dissenyat i veure com es comporta en diferents condicions d'operació.

## 1.3 Abast del projecte

En aquest projecte, l'abast s'ha fixat en l'anàlisi dels dos casos d'estudi que es duen a terme a partir de les simulacions dels mateixos davant diverses perturbacions.



## 2 Elements principals del sistema

### 2.1 Introducció

En aquest apartat es presenten els elements més importants que formen el sistema elèctric de potència de l'illa de Mallorca.

La Figura 1 representa l'esquema principal d'un sistema elèctric. Els seus elements constituents són uns blocs de generació, una xarxa de transport, subestacions de transformació, que poden elevar o disminuir la tensió, la xarxa de distribució i els consums, ja siguin domèstics o industrials.

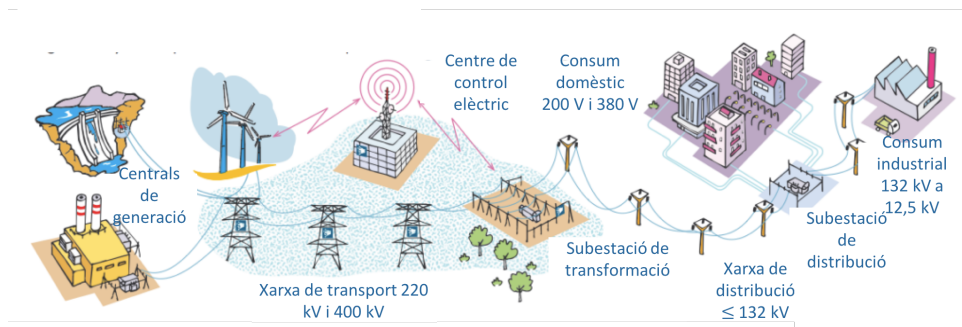


Figura 1: Esquema del sistema elèctric [10]

### 2.2 Centrals tèrmiques

En la simulació del sistema elèctric de potència de Mallorca s'utilitzen tres centrals tèrmiques Son Reus, Cas Tresorer i Es Murterar. Les dues primeres, són centrals de tipus combinat, mentre que la tercera, és de tipus convencional. A continuació es realitza un petit resum del funcionament dels diferents tipus de centrals [4].

- **Central de cycle combinat:** Les centrals tèrmiques de cycle combinat com bé indica el seu nom combinen dos cicles, el de Rankine-based de la turbina de vapor- i el de Brayton-based de la turbina de gas-. Es caracteritza per l'aprofitament del calor no utilitzat per un dels cicles (el de la turbina de gas) que es fa servir com a font de calor de l'altre cicle (el cicle d'aigua-vapor que alimenta la turbina de vapor). D'aquesta manera els gasos a altes temperatures d'escapament del cicle de la turbina de gas proporcionen l'energia necessària pel funcionalment del cicle de vapor. Aquesta configuració permet un eficiència del combustible, obtenint uns rendiments superiors al 55%.
- **Central tèrmica convencional:** En les centrals tèrmiques convencionals (o termoelèctriques convencionals) es produeix electricitat a partir de combustibles fòssils com per exemple el carbó o gas natural, mitjançant un cicle termodinàmic d'aigua-vapor. Els principals elements de una central convencional són:
  - Caldera: és on l'aigua es transforma en vapor. Aquest canvi d'estat es produeix a causa de la combustió del combustible fòssil que genera gasos a alta temperatura i al entrar en

contacte amb l'aigua líquida passa a vapor. Aquest vapor circula per unes canonades on es produeix l'intercanvi de calor entre els gasos de la combustió i l'aigua.

- Turbina de vapor: màquina que recull el vapor i gràcies a un complex sistema de pressions i temperatures (que no s'entra en detall) genera un parell a l'eix que la travessa, el qual està connectat amb el generador.

- Generador: màquina que recull l'energia mecànica generada a l'eix que travessa la turbina i la converteix en energia elèctrica mitjançant la inducció electromagnètica. El resultat és un corrent elèctric trifàsic i altern.

### 2.2.1 Son Reus

La central tèrmica de Son Reus és una central de tipus termoelèctrica de cicle combinat - explicat en el punt 2.2- situada en el municipi de Palma. Els combustibles més utilitzats són gas natural i gasoil, i consta de dos cicles combinats el de Son Reus I i el de Son Reus II. També conta amb 4 turbines de gas de cicle obert. Disposa d'una capacitat de 612 MW segons l'empresa propietària *Endesa* [12].

### 2.2.2 Cas Tresorer

La central tèrmica de Cas Tresorer és una central termoelèctrica de cicle combinat - explicat en l'apartat 2.2- situada en el municipi de Palma. Esta constituïda per dos cicles combinats-Cas Tresorer CC1 i Cas Tresorer CC2- que consumeixen gas natural com a combustible principal. Disposa d'una capacitat de 473 MW segons l'empresa propietària *Endesa* [12].

### 2.2.3 Es Murterar

La central tèrmica de Es Murterar es una central tèrmica convencional - explicada en l'apartat 2.2- situada en el municipi de Alcúdia. Està constituïda per quatre grups de vapor que cremen hulla i per dos grups de turbina de gas, utilitzant gasoil com a combustible. Disposa d'una capacitat de 585 MW segons l'empresa propietària *Endesa* [12].

## 2.3 Interconnexió Península-Mallorca

A més dels elements presentats en la Figura 1, el sistema elèctric de Mallorca disposa d'una interconnexió entre la Península i l'illa. Aquest enllaç elèctric, es coneix com el projecte *Rómulo* [6] i és la primera interconnexió submarina de transport de corrent continu que existeix a Espanya. L'empresa *Red Eléctrica Española* va dur a terme aquest projecte per assegurar la cobertura de la demanda del sistema elèctric balear. El projecte va des de la subestació de Morvedre -ubicada a Sagunto, Valencia- fins a la subestació de Santa Ponça -ubicada a Calvià, Mallorca-.

Es tracta d'una connexió d'alta tensió de  $\pm 250$  kV realitzada mitjançant un enllaç compost per



dos cables de potència amb una capacitat total de 400 MW i un altre cable de retorn que serveix per augmentar la disponibilitat del subministrament elèctric. Els cables tenen una longitud aproximada de 237 km i es localitzen a una profunditat màxima de 1485 m.

Degut a la llarga distància de cablejat l'enllaç està fet en CC així les pèrdues de línia són inferiors que les que tindria en CA, i d'aquesta manera es pot augmentar la potència.

Les característiques principals d'aquest projecte són:

- Sistema de transport de corrent: CC.
- Capacitat de transport: 400 MW (2 x 200 MW).
- Tensió nominal:  $\pm 250$  kV.
- Tecnologia: LCC.
- Tram subterrani: 4 km (Morverdre) + 3 km (Santa Ponça)
- Tram submarí: 237 km.
- Longitud total: 244 km.
- Nombre de circuits: enllaç bipolar amb retorn metàl·lic.
- Nombre de cables elèctrics: 2 cables de potència i un de retorn
- Cables de fibra òptica: 1 cable de 24 fibres.

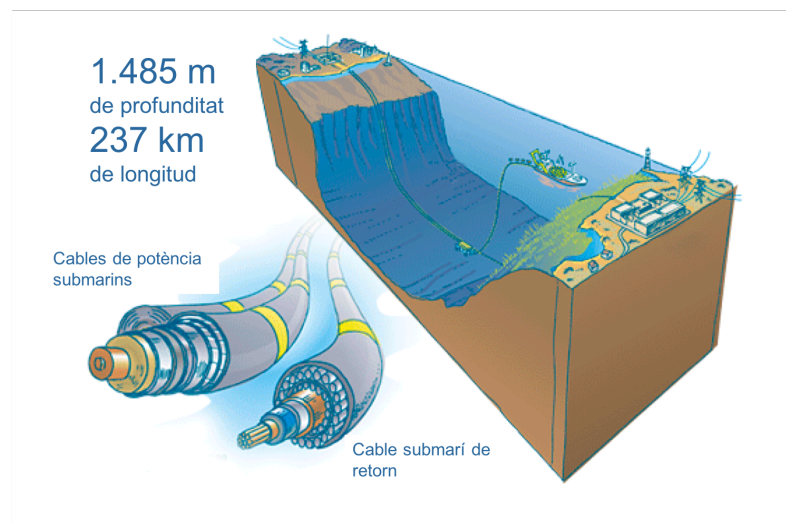


Figura 2: Interconnexió entre la Península i Mallorca [6]

Degut a què el transport de l'electricitat que prové de la Península és en CC, es necessita un convertidor CC/CA per poder fer-ne ús d'ella. Es per això que el proper element que es presenta és el convertidor.

## 2.4 Convertidor CC/CA

Existeixen diversos tipus de convertidors CC/CA per connectar les unitats que generen energia o la transporten -com és en aquest cas- en corrent continu. Els inversors poden classificar-se segons diversos criteris, en quant al tipus de semiconductor utilitzat destaquen dos, que són els més utilitzats [1].

### Convertidor VSC

El convertidor de fonts de tensió o VSC, és un convertidor basat en la tecnologia dels inversors bipolars de porta aïllada (IGBT) que permet la modulació de qualsevol voltatge desitjat a partir de la commutació ràpida dels interruptors.

- Propietats principals del VSC:
  - Permet controlar independentment la potència reactiva de la potència activa.
  - Permet proporcionar la capacitat d'arrencada.
  - Permet injectar corrents harmònics reduïts.
  - Permet utilitzar filtres més lleugers.
- Principal inconvenient:
  - Tenen majors pèrdues degut a la alta freqüència de commutació.

### Convertidor LCC

Aquest convertidor està basat en tiristors o tecnologies similars i requereixen que la xarxa sigui operada.

- Principal avantatge del LCC:
  - Produeixen menys pèrdues degut a la baixa freqüència de commutació.
- Principals inconvenients:
  - Permet controlar la potència activa mentre que consumeix potència reactiva no controlable.
  - Requereix una xarxa per operar.
  - Requereix grans filtres a causa de les importants magnituds de corrent harmònic que genera.

Tot i que el convertidor ubicat en la subestació de Santa Ponça, que transforma el corrent continu transportat des de la Península en corrent altern per l'ús de l'illa, és un convertidor LCC, en aquest projecte s'ha suposat una situació hipotètica en el que, el convertidor és un VSC. Malgrat el disseny del VSC és una mica més complex que el del LCC, el control resulta més senzill gràcies a la possibilitat de poder operar independentment la potència activa de la reactiva. De fet, degut als avantatges del VSC respecte al convertidor LCC es podria plantejar el canvi.

### 3 Modelització del sistema elèctric de potència de Mallorca

#### 3.1 Introducció

En aquest tercer Capítol s'explica de quina manera es modelitza cada un dels elements que s'empren per fer la simulació del sistema elèctric de potència de Mallorca.

Realitzar la simulació de tota la xarxa elèctrica de l'illa pot ser un treball llarg degut a la gran quantitat de subestacions elèctriques amb transformadors que eleven o disminueixen la tensió per passar de la xarxa de transport -verda a la Figura 3- a la de distribució -rosa a la Figura 3-. Per aquest motiu, en aquest projecte només es modelen, controlen i simulen les estacions generadores, la xarxa de transport i el convertidor CC/CA ubicat a Santa Ponça, aquest conjunt d'elements es representat a la Figura 3 com el conjunt de les línies a 220 kV, pintades de color verd.

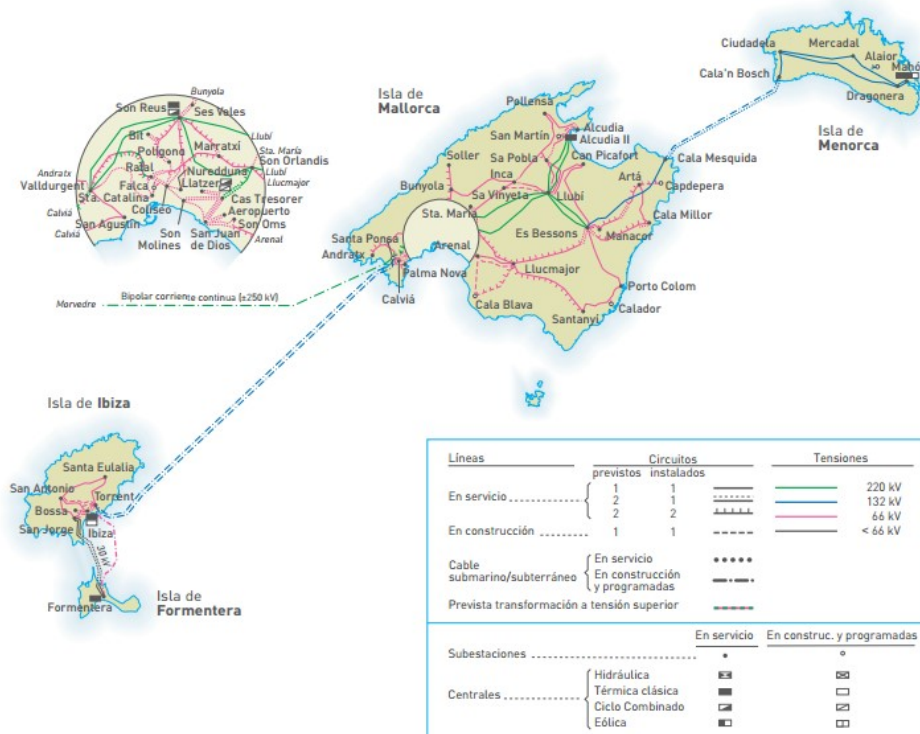


Figura 3: Sistema elèctric balear [10]

#### 3.2 Modelització de les centrals tèrmiques

En relació a la modelització de les centrals, el primer que es realitza és un estudi dels avantatges i inconvenients de les màquines síncrones i asíncrones per poder elegir quina és utilitzada en aquest projecte com a generador elèctric [7].

**Màquina síncrona:**

La màquina síncrona és una màquina elèctrica rotativa de CA en la qual la velocitat de rotació de l'eix i la freqüència elèctrica estan sincronitzades i són mútuament dependents. La màquina pot funcionar tant com a motor o com a generador. Com a motor síncron la seva funció principal és convertir l'energia elèctrica en energia mecànica, en aquest cas la velocitat de rotació de l'eix depèn de la freqüència de la xarxa elèctrica en la qual està connectat. La màquina també pot actuar com a generador elèctric, convertint l'energia mecànica amb elèctrica. La freqüència depèn de la velocitat de rotació i del nombre de pols de la màquina.

- Principals avantatges:
  - Control de la potència activa i reactiva en xarxes CA.
  - Sistema d'excitació de fàcil control.
- Principals inconvenients:
  - Maquinaria voluminosa i cara.

**Màquina asíncrona:**

La màquina asíncrona, també és una màquina rotativa de CA en la qual el rotor gira a una velocitat diferent del camp magnètic de l'estator. Per obtenir un generador asíncron, es connecta un motor a una xarxa trifàsica i s'acobla un motor primari, com per exemple un motor de combustió. Una vegada ha superat la velocitat de sincronisme comença a cedir potència activa al sistema elèctric al que està connectat.

- Principals avantatges:
  - Construcció més simple i generalment més robusta.
  - Simplicitat i seguretat: acoblament molt fàcil, no hi ha risc d'alimentació sobtada de la xarxa per desacoblament.
  - A més parell aplicat en el seu eix, major serà la potència de sortida resultant.
  - Més econòmic.
- Principals inconvenients:
  - A causa de que la màquina no té un sistema d'excitació, el generador necessita que se li injecti una potència reactiva per mantenir el camp magnètic al seu estator.
  - Per potències grans presenta inconvenients.

**Elecció de tipus de generador per a aquest sistema:**

Fent un balanç dels avantatges i inconvenients de les dues màquines, l'asíncrona presenta més avantatges a priori, encara que per a l'operació d'un generador d'una central elèctrica cal destacar que la màquina síncrona té dos grans avantatges.

El primer és que la velocitat de sincronisme està vinculada directament amb la freqüència de la

xarxa sent aquesta, expressada en la següent equació (1).

$$w_s = \frac{2\pi f_e}{p} \quad (1)$$

On  $f_e$  és la freqüència a la que està sotmesa la xarxa elèctrica i  $p$  és el nombre de pols de la màquina síncrona.

El segon avantatge important està relacionat amb les grans magnituds de potència activa que es generen a les centrals, la màquina asíncrona no està preparada per treballar en tals dimensions. Per aquests motius exposats, en aquest projecte s'elegeix la màquina síncrona per tal de modelitzar els generadors de les tres centrals termoelèctriques explicades en el Capítol 2.

Un cop s'escull el tipus de màquina es procedeix a modelitzar la resta d'elements del grup generador. La Figura 4 és un exemple de la modelització d'una central elèctrica, en concret la realitzada per a la central de Son Reus. Les centrals de l'illa de Mallorca generen potència a una tensió nominal de 20 kV. Com s'explica en la introducció d'aquest mateix capítol, el conjunt estudiat en aquest projecte és la xarxa que està a una tensió de 220 kV, per tant es connecta un transformador de tensió a continuació del generador per pujar la tensió de la xarxa de 20 a 220 kV.

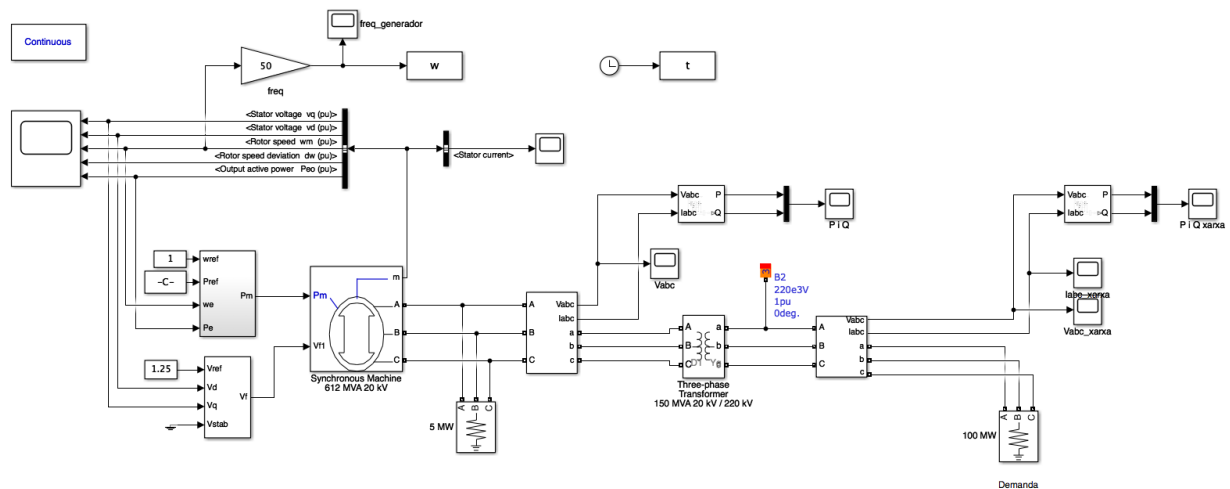


Figura 4: Exemple modelització central de Son Reus

La màquina síncrona que actua com a generador requereix dos paràmetres, la potència mecànica de la turbina i la tensió d'excitació. La turbina s'ha modelitzat amb un controlador PI com s'observa a la Figura 5. El control de la mateixa s'explica més endavant en el Capítol 4.

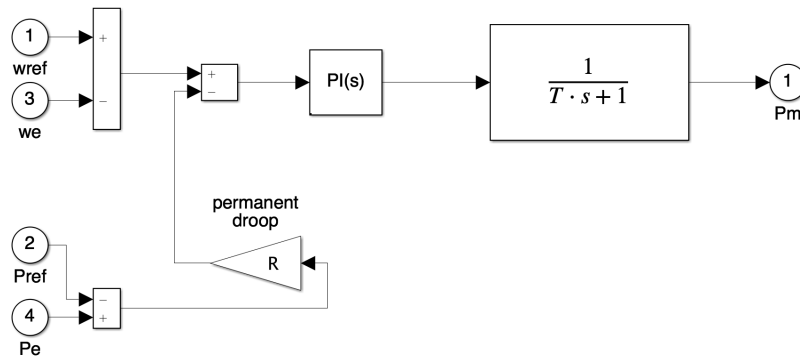


Figura 5: Modelització de la turbina

L'abast d'aquest projecte no entra en detall amb l'explicació de la teoria dels controladors però cal tenir en consideració els aspectes bàsics del funcionament del mateix.

La funció de transferència del bloc de control PI correspon a l'equació (2).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \left( \frac{1}{T_R s} + 1 \right) \quad (2)$$

On  $K_p$  i  $T_R$  són els paràmetres que es poden modificar depenent del sistema que es tingui. La resposta del regulador PI és la suma de les respostes degudes al control proporcional P, que es instantani a la detecció del senyal d'error, i amb un cert retard entra en acció el control integral I, que es l'encarregat d'anular totalment aquest senyal d'error.

### 3.3 Modelització del convertidor VSC

Com s'explica en el Capítol 2, el convertidor utilitzat en aquest treball és el VSC. Aquest model es realitza a partir de la teoria explicada en el primer capítol de *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems* 1. El sistema es munta com a la Figura 6.

Els principals elements d'aquest conjunt són explicats en el Capítol 4.

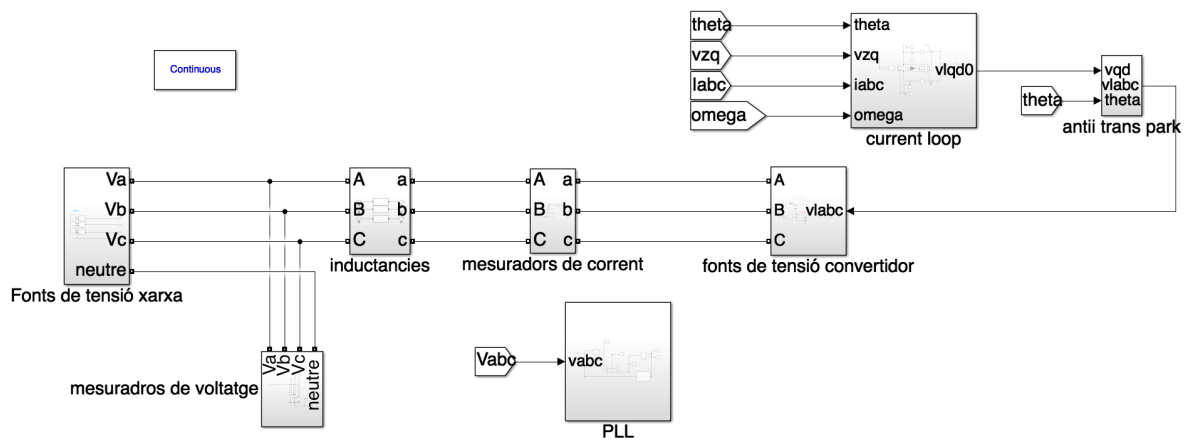
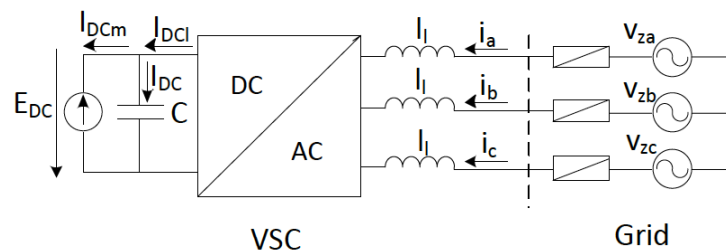


Figura 6: Modelització del VSC

Tot i que el convertidor VSC es basa en els estats discrets de la commutació dels IGBT, per a propòsits de disseny de control és convenient derivar un model equivalent amitjanat. Es pot derivar un model simplificat desacoblant les parts DC i AC del convertidor tal com es mostra a la Figura 7. El costat DC es modela com a font de corrent i un condensador, mentre que el costat AC es modela amb fonts de corrent altern. La font actual del costat DC reflecteix la potència activa intercanviada entre el CA i el corrent continu i assegura el balanç de potència del sistema.

Figura 7: Circuit equivalent en  $\pi$  d'una línia [1]

### 3.4 Model de les línies CA

Per tal de modelitzar les línies de tensió trifàsiques, s'ha d'establir una relació entre la tensió i la intensitat al llarg de la línia.

El model més habitual per a l'estudi d'aquestes línies, és l'equivalent  $\pi$  [11], ja que per obtenir els paràmetres del circuit es pot fer fàcilment a partir de les equacions que relacionen les variables d'entrada i les de sortida. D'aquesta manera es poden obtenir els paràmetres del circuit de la Figura 8.

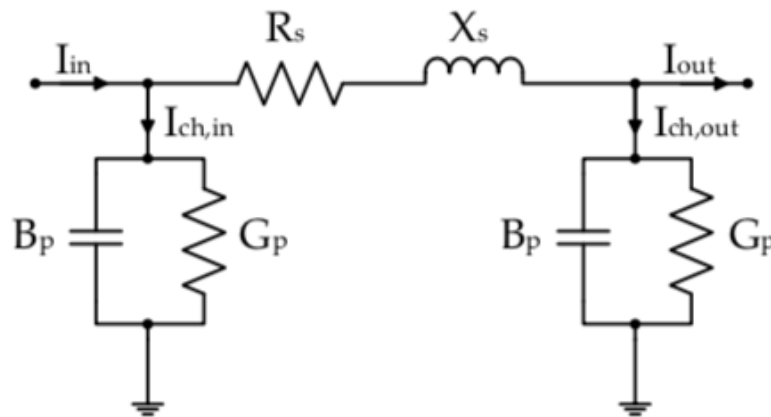


Figura 8: Circuit equivalent en  $\pi$  d'una línia [5]

Per aquest projecte s'utilitza de la llibreria *Specialized Power Systems* de *Simulink* el bloc Pi Section Line representat a la Figura 9. Aquest bloc és una línia de transmissió de secció  $\pi$ , els elements *RLC* són computats utilitzant correccions hiperbòliques a la freqüència especificada.

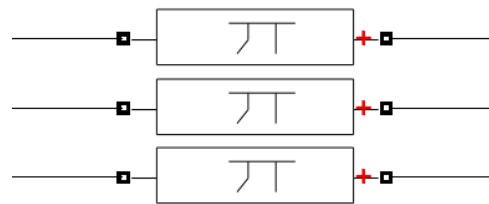
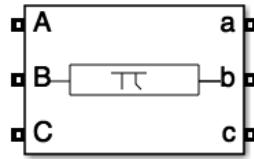


Figura 9: Blocs utilitzats per modelar l'equivalent  $\pi$

La llibreria *Specialized Power Systems* també disposa del Three Phase Pi Section Line representat a la Figura 10 que modela una línia trifàsica amb una secció única  $\pi$ , el model consisteix en un conjunt d'elements *RL* connectats en sèrie entre l'entrada i la sortida del terminal, i de dos conjunts de condensadors ubicats en els dos extrems de la línia. Aquest bloc no s'utilitza en aquest projecte degut que alenteix el temps de la simulació quan s'executa el conjunt de tots els elements.



Figura 10: Altre possible bloc per modelar l'equivalent  $\pi$ 

### 3.5 Càrregues de demanda

El darrer element principal de la xarxa elèctrica de l'illa de Mallorca és la demanda. Es realitza un estudi a través de la pàgina oficial de *Red Eléctrica de España* [10] en el qual es conclou que la demanda diària de Mallorca fluctua entre 300 i 650 MW. La Figura 11 és un exemple de la demanda diària per hores de l'illa, concretament és la potència demandada de dia 27/05/2019 [10].

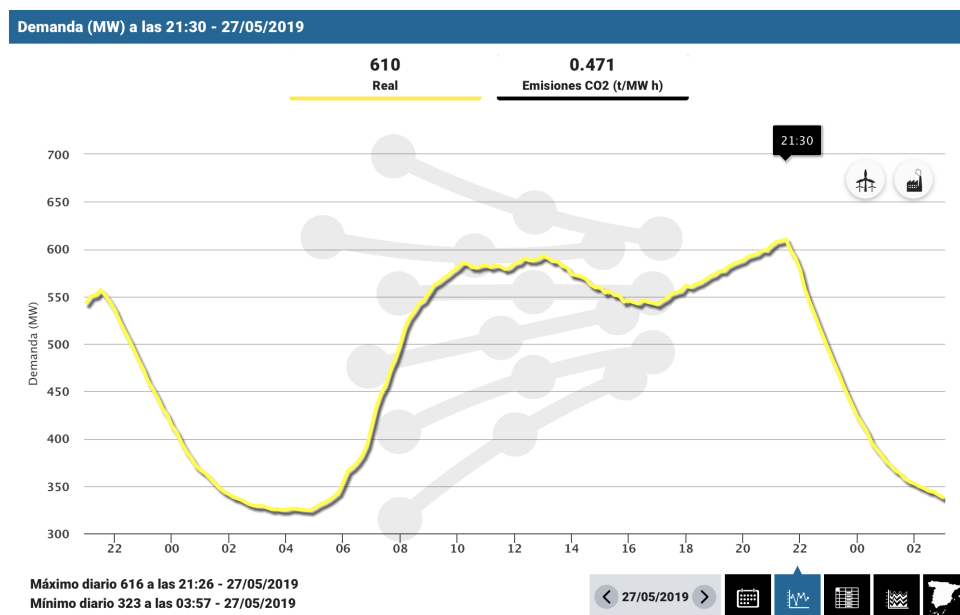


Figura 11: Gràfic de la demanda a l'illa de Mallorca [10]

Per tal d'assegurar que el sistema sempre pugui proporcionar la potència demandada, s'estableix que la potència que es genera és  $P_{gen}=700$  MW. A partir d'aquí es realitza un càlcul aproximat de la distribució de la potència generada a l'illa a la Taula 1 que s'explica al llarg del projecte.

Potència [MW]	
Generada	[MW]
Son Reus	240
Es Tresorer	150
Es Murterar	170
Interconnexió	150

Taula 1: Potència generada situació 1

Potència [MW]	
Generada	[MW]
Son Reus	255
Es Tresorer	150
Interconnexió 1	150
Interconnexió 2	150

Taula 2: Potència generada situació 2

## 4 Control del sistema elèctric de potencia de Mallorca

### 4.1 Introducció

Amb la finalitat de que el sistema modelitzat proporcioni un subministrament elèctric eficient, segur i sostenible, s'han de complir uns certs requisits. Són principalment dos: l'estabilitat de la freqüència i el manteniment del valor eficaç de la tensió dins d'uns marges.

En relació a l'estabilitat de la freqüència, cada un dels mòduls de generació d'electricitat ha de ser capaç d'estar connectat a la xarxa i funcionar dins dels rangs de freqüència especificats en la Taula 3.

Rang de freqüència	Període de temps de funcionament
47,0 Hz - 47,5 Hz	3 segons
47,5 Hz - 48,0 Hz	1 hora
48,0 Hz - 51,0 Hz	Il·limitat
51,0 Hz - 52,0 Hz	1 hora

Taula 3: Període de temps mínim pel qual un mòdul ha de ser capaç de funcionar [9]

El segon requisit es basa en assegurar que la tensió de la xarxa elèctrica estigui dins dels límits establerts. En aquest treball, com s'ha explicat en el Capítol 3 es modelitza i simula la xarxa de 220 kV, així que la tensió de les línies ha d'estar dins l'interval especificat en la segona fila de la Taula 4.

Nivell	Mínim	Màxim
400 kV	375 kV	435 kV
220 kV	200 kV	245 kV

Taula 4: Límits de tensió de la xarxa elèctrica [9]

Per tant, aquest capítol estudia el control dels diferents elements del sistema elèctric a partir dels dos requisits explicats en aquesta introducció.

### 4.2 Control de les turbines a les centrals tèrmiques

Com es comenta a la introducció d'aquest capítol, el control de la generació es basa en el manteniment estricte de la freqüència. Aquesta variable està relacionada estretament amb l'equilibri de la potència activa de tot el sistema, degut a que una variació brusca de la potència activa demandada donarà lloc a una variació en la freqüència que afectarà en tot el sistema.

Així com la freqüència està estretament relacionada amb la potència activa, també existeix una forta relació amb els fluxos de potència reactiva i els mòduls de tensió.

Existeix una jerarquia per l'estructura general del control que consta de tres nivells:

- **Nivell primari:** A nivell local (cada unitat de generació).
- **Nivell secundari:** A nivell zonal (àrees o regions).
- **Nivell terciari:** A nivell global de tot el sistema.

En aquest projecte s'estudia el control primari per la relació  $P_f$ , mentre que el nivell secundari de  $P_f$  es realitza de forma manual.

#### 4.2.1 Control primari $P_f$

El control primari és el que es realitza a cada unitat de generació, en aquest projecte en cada turbina que genera la potència mecànica que absorbeix la màquina síncrona.

Al connectar dos o més generadors a la xarxa, com que cada un d'ells tendeix a regular la seva velocitat de sincronisme pot provocar un control inestable. Per evitar aquest problema, es permet una certa caiguda de la velocitat i s'incorpora un senyal de consigna de la potència que es desitja que el generador subministri. Això s'aconsegueix afegint un llaç de realimentació al voltant de l'integrador, com es mostra a la Figura 12. D'aquesta forma s'obté el que es denomina estaticisme positiu.

La funció de transferència s'obté del diagrama de blocs i es:

$$\Delta P_{val} = \frac{1}{1 + sT_R} (\Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega) \quad (3)$$

on  $\Delta P_{ref}$  és la variació de potència de consigna,  $P_e - P_{ref}$ , la  $T_R$  és la constant de temps i la  $R$  es coneix com la constant de l'estaticisme d'un generador i expressa la variació que pateix la velocitat (freqüència) de la màquina quan la potència generada passa de zero al seu valor nominal. En valors reals, les unitats de la  $R$  són (rad/s)/MW o Hz/MW.

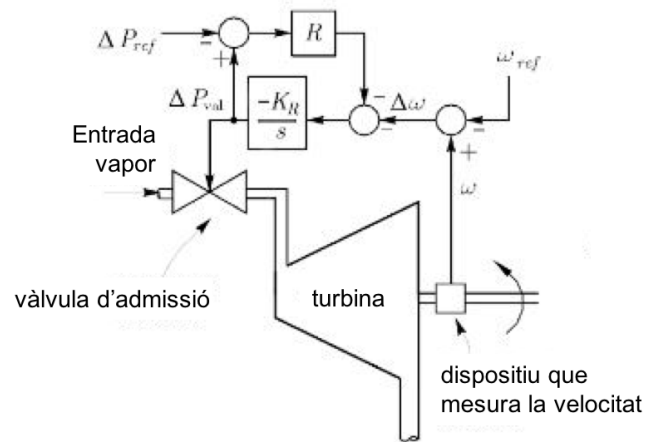


Figura 12: Control turbina [2]

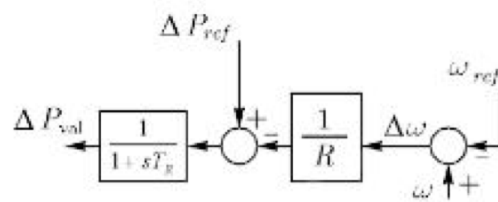


Figura 13: Diagrama turbina [2]

## Son Reus

En primer lloc, es realitza un estudi del model de la central termoelèctrica de Son Reus variant la  $T_R$  del sistema de primer ordre de la turbina des de  $T_R=0s$  segons fins a  $T_R=2s$ , augmentant amb un interval de 0,1. La representació de la freqüència respecte el temps es recull en el Figura 14.  $T_R$  al ser la constant de temps d'un controlador PI. Com s'observa a la Figura 14, així com va incrementant el valor de  $T_R$  el la freqüència tarda més en estabilitzar-se al valor de 50 Hz, que es l'objectiu principal. Es marca l'interval de període de treball il·limitat exposat a la Taula 3.

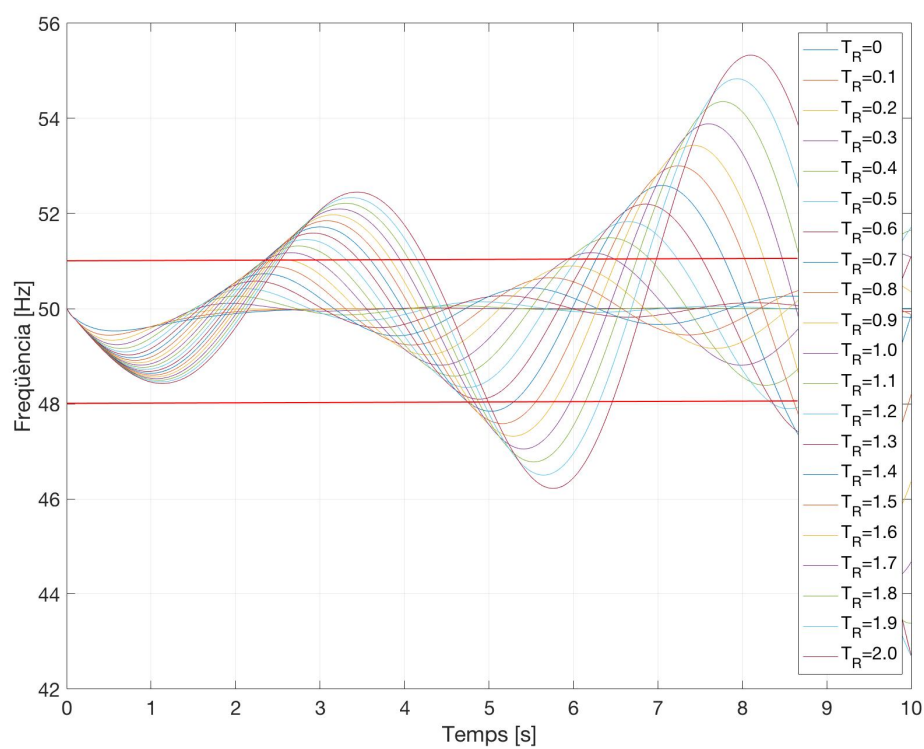


Figura 14: Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de  $T_R$

Per assegurar que la freqüència està dins l'interval definit, la  $T_R$  queda compresa dins dels valors 0 i 0,9 segons.

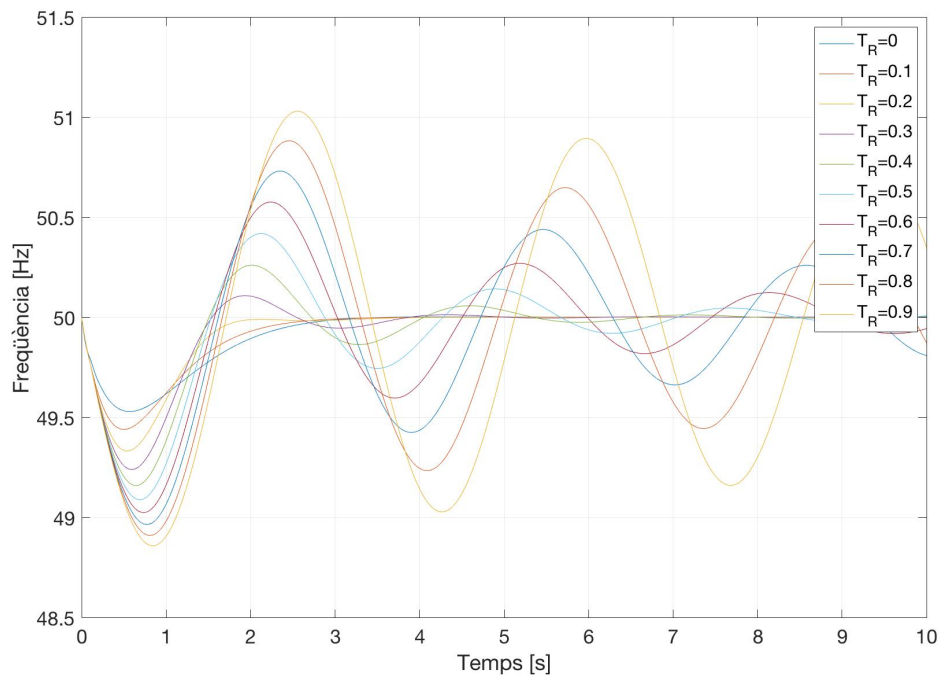


Figura 15: Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de  $T_R$  dins de l'interval desitjat

Els següents paràmetres estudiats són les constants  $K_p$  i  $K_i$  del controlador PI que s'afegeix al sistema com es veu a la Figura 5. Així que, els valors de  $K_p$  i  $K_i$  per tal d'assegurar que el funcionament del sistema dins dels límits establerts, poden estar compresos entre 4 i  $\infty$ .

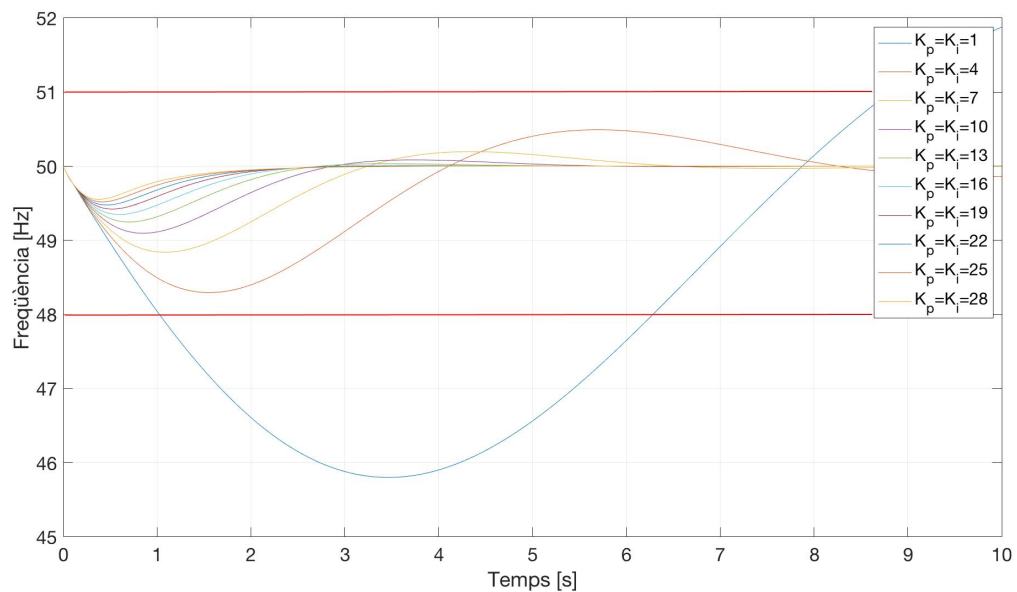


Figura 16: Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de  $K_p$  i  $K_i$

En tercer lloc, es procedeix a estudiar la variació de la freqüència respecte als valors del *permanent droop*. Com s'observa a la Figura 17, la variació del paràmetre  $R$  no ocasiona gaire desviació a la freqüència. L'únic que es té en compte, és que per grans valors de  $R$ , es produeixen petites pertorbacions que es poden veure a la Figura 18.

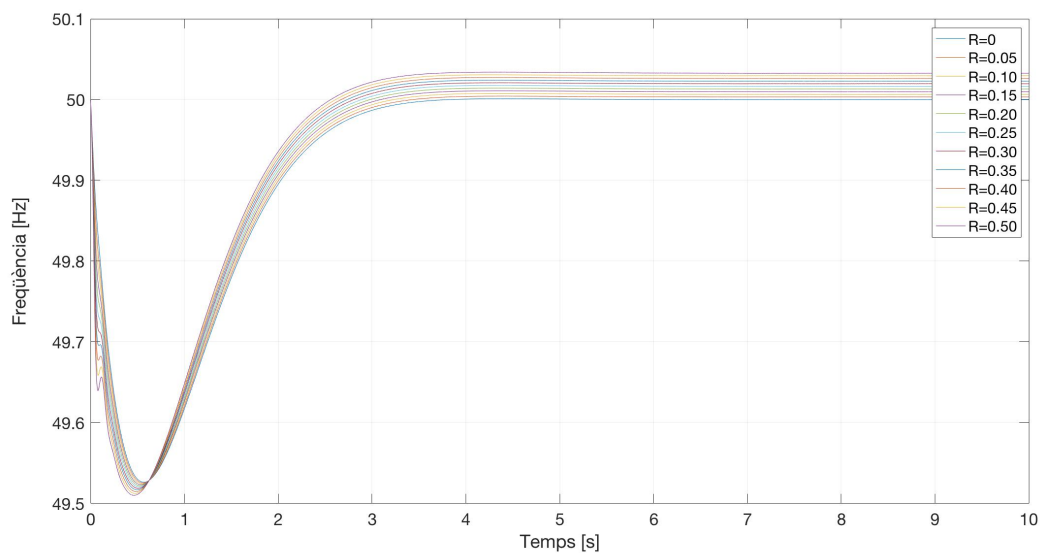


Figura 17: Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de  $R$

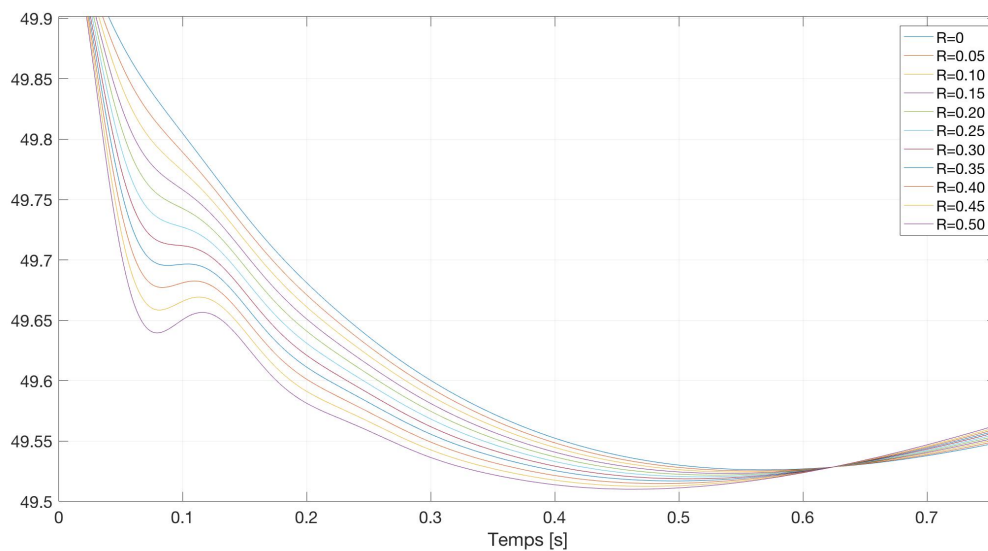


Figura 18: Variació de la freqüència respecte el temps pels diferents valors de  $R$



#### 4.2.2 Control Secundari $P_f$

Amb el disseny del control primari, una variació de càrrega provoca un  $\Delta f$  en règim permanent, quan un dels principals objectius d'aquest projecte és que  $\Delta f=0$ . A continuació, es realitza un control manual per mantenir la freqüència de la xarxa en el seu valor nominal  $f=50$  Hz, que s'aconsegueix a partir de l'ajustament de la consigna de potència de cada unitat de la  $\Delta P_{ref}$ . El control primari es realitza a nivell d'àrees o regions, així que suposant que la regió d'aquest projecte és el Sistema Elèctric de Mallorca, es munta el conjunt per estudiar l'ajustament d'aquests valors. Es realitzen una sèrie de proves fins a trobar l'ajustament de la consigna de la potència de referència per a cada una de les màquines. Els valors pel primer cas d'estudi es mostren a la Taula 5.

Central	$P_{ref}$ [MW]	Ajustament	$P_{generada}$ [MW]
Son Reus	150	1,63	244,5
Cas Tresorer	100	1,5	150
Es Murterar	100	1,7	170

Taula 5: Ajust del valor de la consigna pel primer cas d'estudi

En el segon cas d'estudi, al eliminar una de les centrals elèctriques i connectar un altre VSC es reajusten els valors de les consignes de la potència de referència. Els valors pel segon cas d'estudi es mostren a la Taula 6.

Central	$P_{ref}$ [MW]	Ajustament	$P_{generada}$ [MW]
Son Reus	150	1,7	255
Cas Tresorer	100	1,5	150

Taula 6: Ajust del valor de la consigna pel segon cas d'estudi

#### 4.2.3 Paràmetres

##### Son Reus

Els paràmetres utilitzats en la central de Son Reus són els exposats en la Taula 7.

Paràmetre	Valor
$V_{ref}$	20 kV
$P_{ref}$	244,5 MW
$K_I$	20
$K_P$	20
$T_R$	0,01 s

Taula 7: Paràmetres de la central de Son Reus

### Cas Tresorer

En el cas de la central de Cas Tresorer, es realitzen els mateixos estudis explicats per la central de Son Reus. En aquest cas, els valors dels paràmetres són els exposats a la Taula 8.

Paràmetre	Valor
$V_{ref}$	20 kV
$P_{ref}$	150 MW
$K_I$	20
$K_P$	20
$T_R$	0,01 s

Taula 8: Paràmetres de la central de Cas Tresorer

### Es Murterar

En el cas de la central de Es Murterar, es realitzen els mateixos estudis explicats per la central de Son Reus. En aquest cas, els valors dels paràmetres són els exposats a la Taula 9.

Paràmetre	Valor
$V_{ref}$	20 kV
$P_{ref}$	170 MW
$K_I$	20
$K_P$	20
$T_R$	0,01 s

Taula 9: Paràmetres de la central de Es Murterar

## 4.3 Control de P i Q a partir del VSC

### 4.3.1 Transformada de Clarke

La teoria de la potència instantània explicada en l'apartat 4.3.2 es basa en la transformació de les tres fases elèctriques instantànies de la referència  $abc$  a la referència ortogonal  $\alpha\beta 0$  utilitzant la transformada de Clarke, que es defineix com:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}][x_{abc}] \quad (4)$$

I la seva inversa és:

$$[x_{abc}] = [T_{\alpha\beta 0}]^{-1}[x_{\alpha\beta 0}] \quad (5)$$

On el vector  $x_{abc}$  és en la referència  $abc$  i el vector  $x_{\alpha\beta 0}$  és la transformada en la referència  $\alpha\beta 0$ . Les expressions de les equacions (4) i (5) poden ser també descrites com:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix}$$

On  $x_a$ ,  $x_b$  i  $x_c$  són els valors instantanis del corrent o del voltatge en la referència  $abc$  mentre que  $x_\alpha$ ,  $x_\beta$  i  $x_0$  són els valors transformats en la referència  $x_{\alpha\beta 0}$ .

La transformada de Clarke també es pot representar com una transformació geomètrica representada en la Figura 19.

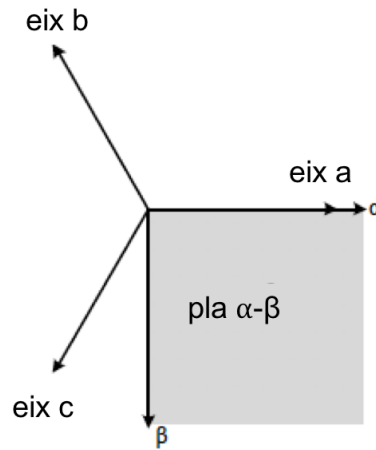


Figura 19: Representació del pla  $\alpha$ - $\beta$  [1]

#### 4.3.2 Transformada de Park

Es realitza l'aplicació de la transformada de Park, per tal de convertir els valors sinusoidals de la referència  $abc$  en valors constants en la referència  $qd0$ . La transformada de Park és una combinació de la transformada de Clarke i de l'aplicació d'una rotació. El primer element, és el que es coneix com a la transformada de Clarke, el qual es basa en transformar les tres variables instantànies expressades en el marc  $abc$  al marc ortogonal  $\alpha\beta 0$ . Les tensions passen de tenir un desfasament de  $120^\circ$  a un de  $90^\circ$ .

La segona part, consisteix en fer rotar els marcs de referència de manera que les formes d'ona de corrent altern es converteixen en senyals de corrent continu, d'aquesta manera els càlculs que es duen a terme resulten més simples. En aquesta modelització amb l'angle de la xarxa obtingut del controlador PLL, es realitza la transformada de Park pel control del convertidor, una vegada

s'obté el valor que es vol aplicar  $V_{qd0}$ , al tenir l'angle de la xarxa, s'aplica l'anti-transformada de Park per obtenir  $V_{la}$ ,  $V_{lb}$  i  $V_{lc}$ , tensió trifàsica de la part del convertidor VSC.

$$[x_{qd0}] = [T_{qd0}][x_{abc}] \quad (7)$$

I la seva inversa:

$$[x_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1}[x_{qd0}] \quad (8)$$

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

I la seva inversa:

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La transformada de Park també es pot veure com una transformada geomètrica que combina la de Clarke de la Figura 19 i una rotació representada en la Figura 20.

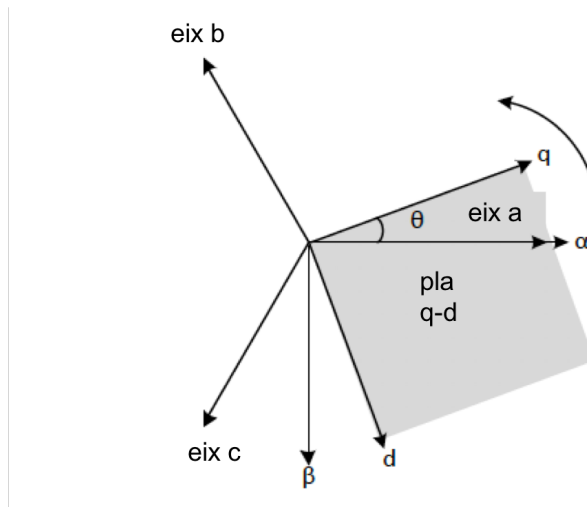
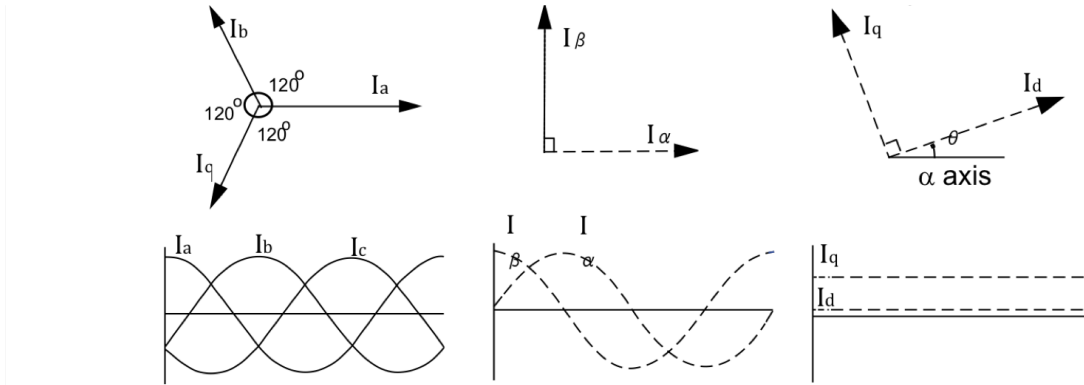


Figura 20: Representació pla  $qd0$  [1]

Les transformades de Clarke i Park es poden resumir visualment amb la següent Figura 21.

Figura 21: D'esquerra a dreta: referència  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $qd0$ 

Font: Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations, MSS Software Implementations User Guide [13]

### Teoria de la potència instantània en el marc de referència síncrona

L'angle  $\theta$  utilitzat en la transformada de Park correspon a l'angle del voltatge elèctric. Reemplaçant l'angle  $\theta$  per  $\theta = \omega t + \phi_0$  i transformant els voltatges i corrents de la referència  $abc$  a la  $qd0$ , els fasors de voltatge i corrent queden definits com:

$$\underline{V}^{qd} = \frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

$$\underline{I}^{qd} = \frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

La potència aparent del sistema trifàsic és:

$$\underline{S} = P + jQ = 3\underline{V}^{qd}\underline{I}^{qd*} = 3\left(\frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}}\right) \quad (13)$$

Organitzant l'equació (13), la potència activa i la reactiva poden ser expressades com:

$$P = \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d i_d) \quad (14)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q)$$

#### 4.3.3 Equacions del voltatge en el marc de referència síncrona

Del model equivalent de la part de corrent altern del convertidor VSC, que es veu en la Figura 22, s'obtenen les equacions del voltatge en el marc de referència síncrona.

$$\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - (v_{0l} - v_{0z}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

on els  $v_{za}$ ,  $v_{zb}$  i  $v_{zc}$  són els voltatges instantanis de la xarxa en la referència  $abc$ , mentre que  $v_{la}$ ,  $v_{lb}$  i  $v_{lc}$  són els voltatges instantanis de la parts del convertidor en la referència  $abc$ ,  $i_a$ ,  $i_b$  i  $i_c$  són els corrents trifàsics en la referència  $abc$ , la resistència equivalent és  $r_l$  i la inductància és el paràmetre  $l_l$ . La diferència de tensió entre el convertidor i el neutre de la xarxa correspon a  $v_{l0} - v_{z0}$ . En el cas que no hagi neutre, la deferència queda definida com:

$$v_{l0} - v_{z0} = \frac{1}{3}[1 \ 1 \ 1](v_z^{abc} - v_l^{abc}) \quad (16)$$

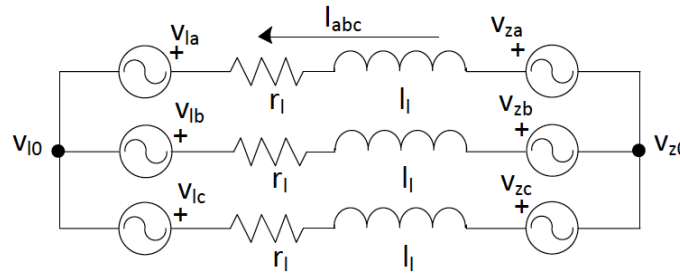


Figura 22: Model equivalent de la part AC del convertidor VSC [1]

#### 4.3.4 Càlcul dels corrents de referència

Els corrents de referència  $i_d^*$  i  $i_q^*$  per obtenir les potències actives i reactives desitjades,  $P^*$  i  $Q^*$ , s'obtenen de la teoria de la potència instantània en el marc de referència síncrona a partir de l'expressió (14).

$$P^* = \frac{3}{2}(v_{zq}i_q^* + v_{zd}i_d^*) \quad Q^* = \frac{3}{2}(v_{zq}i_d^* - v_{zd}i_q^*) \quad (17)$$

Com que  $v_{zd}=0$ , que ho assegura el controlador PLL, explicat a continuació, es substitueix a l'equació (17) i s'obté que els corrents  $i_d^*$  i  $i_q^*$  són:

$$i_d^* = \frac{2}{3} \frac{Q^*}{v_{zq}} \quad i_q^* = \frac{2}{3} \frac{P^*}{v_{zq}} \quad (18)$$

#### 4.3.5 Esquema general de control

El controlador VSC opera dues variables elèctriques en la referència  $qd0$  permetent controlar de forma separada la potència activa de la reactiva. L'esquema de control està basat en un control de dos nivells en cascada. El nivell baix permet regular el corrent AC en la referència  $qd0$ , mentre que el nivell alt regula el voltatge del bus de la part continua.

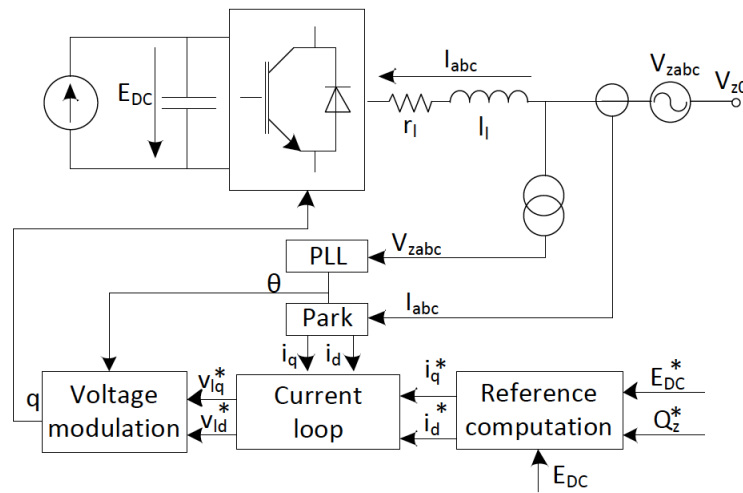


Figura 23: Esquema general del control del convertidor [1]

#### 4.3.6 Control del llaç de corrent

Assumint que  $v_{zd}=0$ , les equacions de tensió poden ser escrites com:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_e \\ -l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

On la  $r_l$  i la  $l_l$  són, respectivament, la resistència i la inductància de la xarxa de la part alterna del convertidor VSC.

A l'equació (19) s'observa que els components  $qd$  estan acoblats. Per tal de controlar aquests dos components de forma separada, es desacoblen com mostra la Figura 89. El desacoblament és un procés complex el qual no s'explicarà amb profunditat en aquest projecte.

El controlador que s'utilitza, es dissenya emprant la tècnica de control de models interns.

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (20)$$

On les constants  $K_p$  i  $K_i$ , són calculades com:

$$K_p = \frac{l_l}{\tau} \quad (21)$$

$$K_i = \frac{r_l}{\tau}$$

On la  $\tau$  és la constant de temps de primer ordre del sistema elèctric. Aquesta constant es elegida tenint en compte les restriccions físiques. En aquest projecte, la  $\tau$  es calcula com el temps que tarda el sistema en arribar al 63% del valor final de la funció esglaó que s'utilitza quan s'apliquen els corrents de referència  $i_q$  i  $i_d$ .

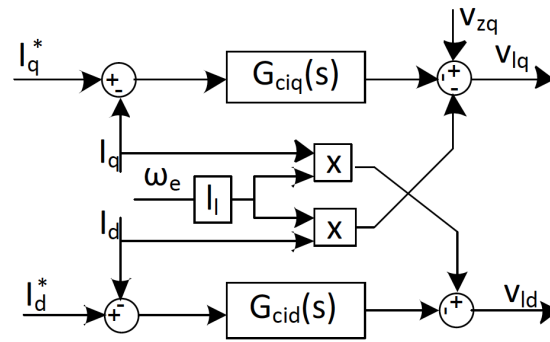


Figura 24: Control del llaç de corrent [1]

#### 4.3.7 Paràmetres del VSC

El convertidor VSC es modelitza com la mostra la Figura 6 i es dissenya amb la teoria presentada en la Subsecció 4.3. A partir de les equacions presentades es calculen els paràmetres del mateix pel funcionament dins del conjunt del sistema elèctric de Mallorca.

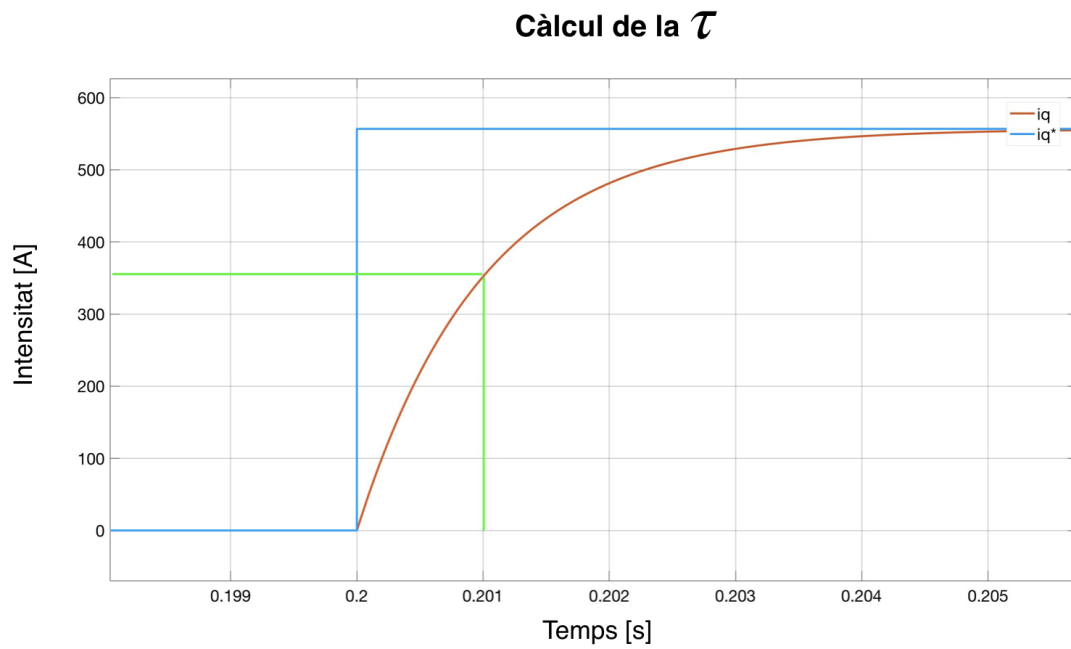
En aquest cas s'afegeixen 3 fonts de tensió controlables per injectar la tensió de la xarxa desitjada.

En primer lloc es defineix el valor de  $i_q^*$ . Com indica a la Taula 1, es desitja que el VSC aporti al sistema una potència de 150 MW, així que utilitzant l'equació (18) s'obté que la intensitat necessària per aquest valor és de 454 A. Per altra banda, el valor de  $i_d^*$  el fixam hipotèticament a 0 amperes ja que només interessa controlar la potència activa en aquest projecte.

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{150 \cdot 10^6}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 220 \cdot 10^3} = 556,7 \text{ A}$$

A continuació, es calcula el valor de  $\tau$  com el temps que tarda el sistema en assolir el 63% del valor final de la funció esglaó. El 63 % d'aquesta valor correspon a 286,02 A, com es veu a la Figura 25 aquest valor correspon a  $t=0,001$  segons a partir que comença la funció esglaó, per tant la  $\tau=10^{-3}$  segons.



Figura 25: Càlcul de la  $\tau$ 

Els valors de les resistències i inductàncies es fixen a  $r_l=10^{-3}$  i  $l_l=10^{-3}$ , per tant de (21) es dedueix que  $K_p=K_i=1$ . El valor del condensador,  $C=1020 \mu H$ .

Paràmetre	Valor
$V_{lnia}$	220 kV
$r_l$	$10^{-3} \Omega$
$l_l$	$10^{-3} H$
$K_p$	1
$K_i$	1
$\tau$	$10^{-3} s$
$i_q^*$	556,7 A
$i_d^*$	0 A
$C$	$1020 \mu H$

Taula 10: Paràmetres del convertidor VSC

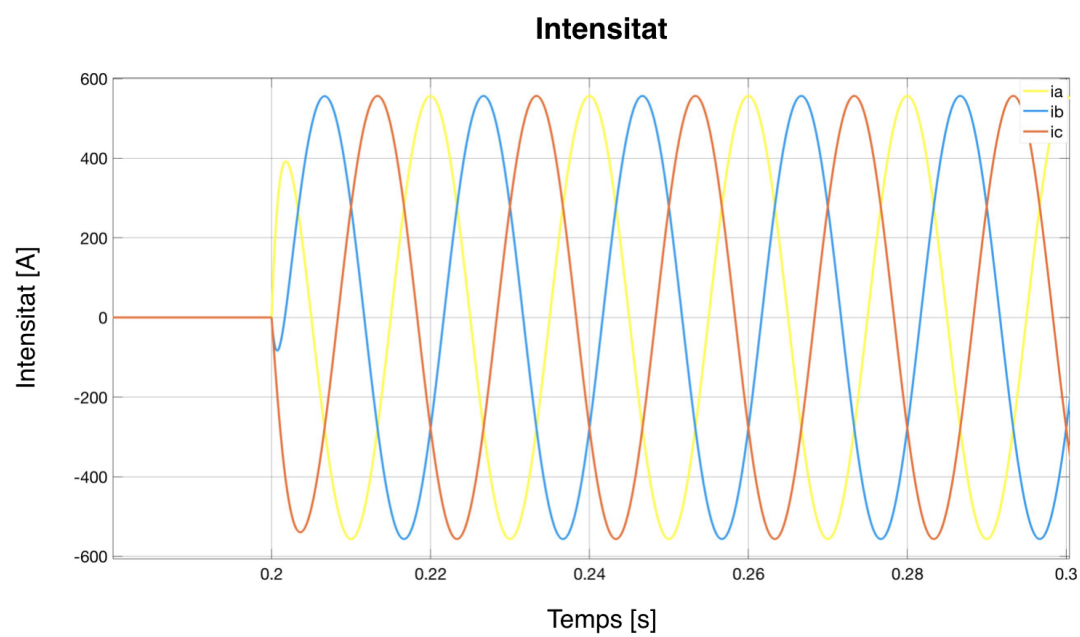
Figura 26: Tensió  $v_{zabc}$  de la part de la xarxa del VSC

Figura 27: Intensitat del VSC

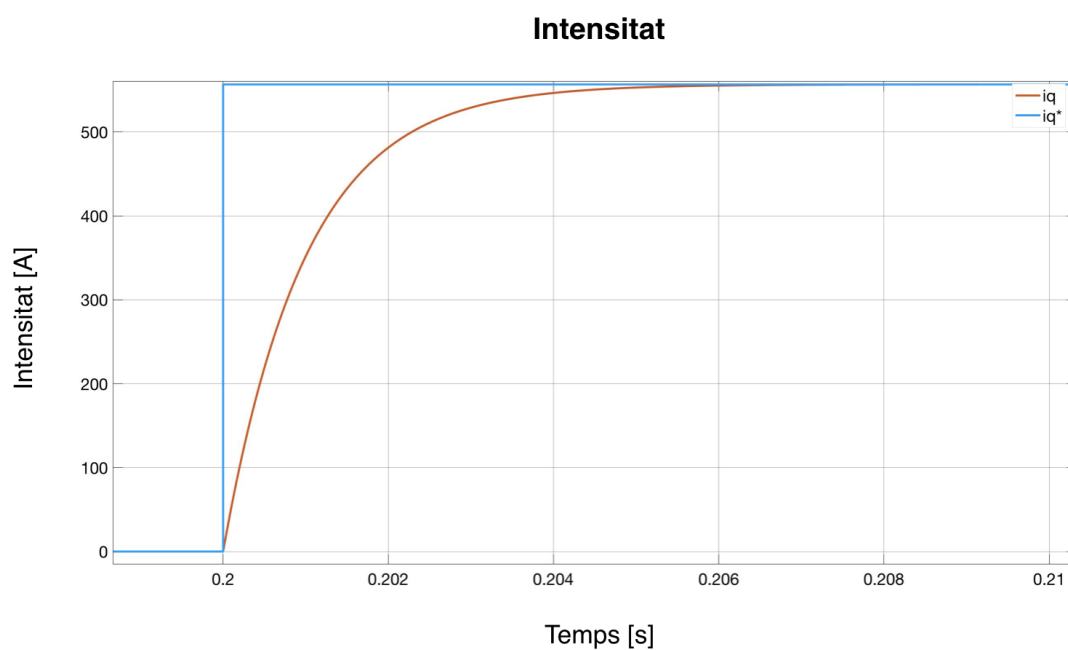
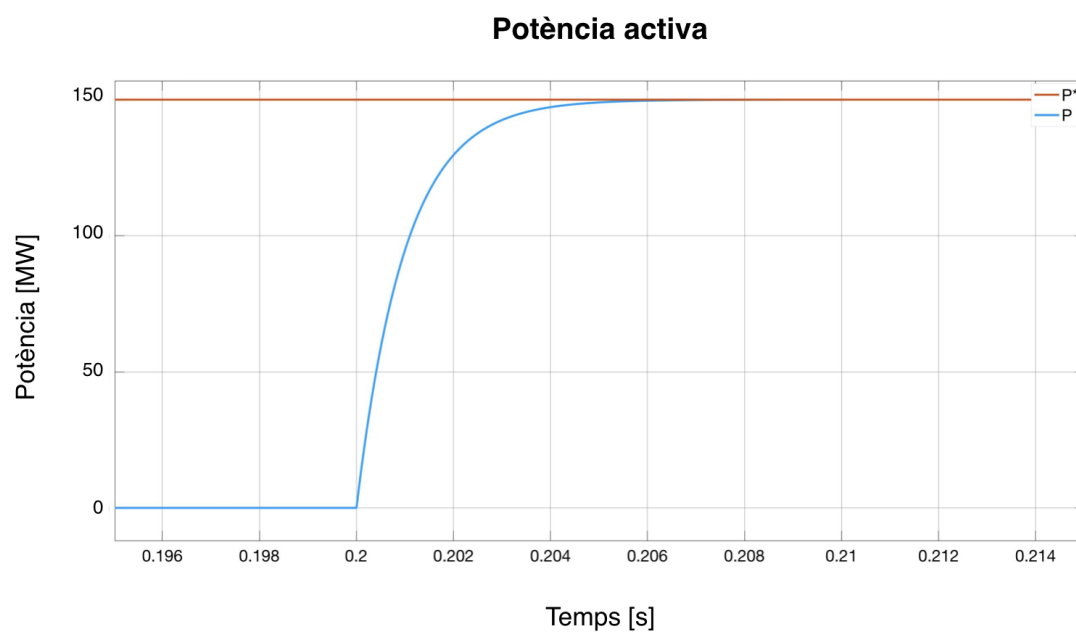
Figura 28: Intensitat en referència  $qd0$  del VSC

Figura 29: Potència activa del VSC

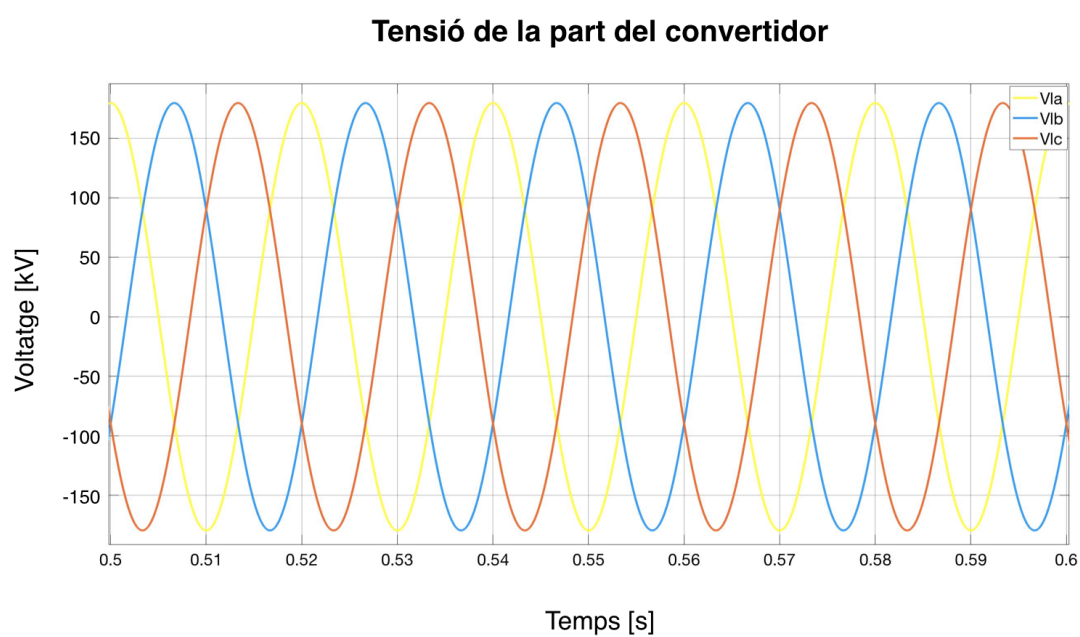


Figura 30: Tensió  $V_{labc}$  de la part del convertidor VSC

## 5 Primer cas d'estudi: cas actual de la xarxa elèctrica de Mallorca

Aquest primer cas d'estudi és la simulació d'una simplificació del Sistema Elèctric de Potència de Mallorca (Figura 31). S'analitza el comportament de la freqüència i les potències generades per les màquines síncrones davant alguns escenaris exposats en la Taula 11.

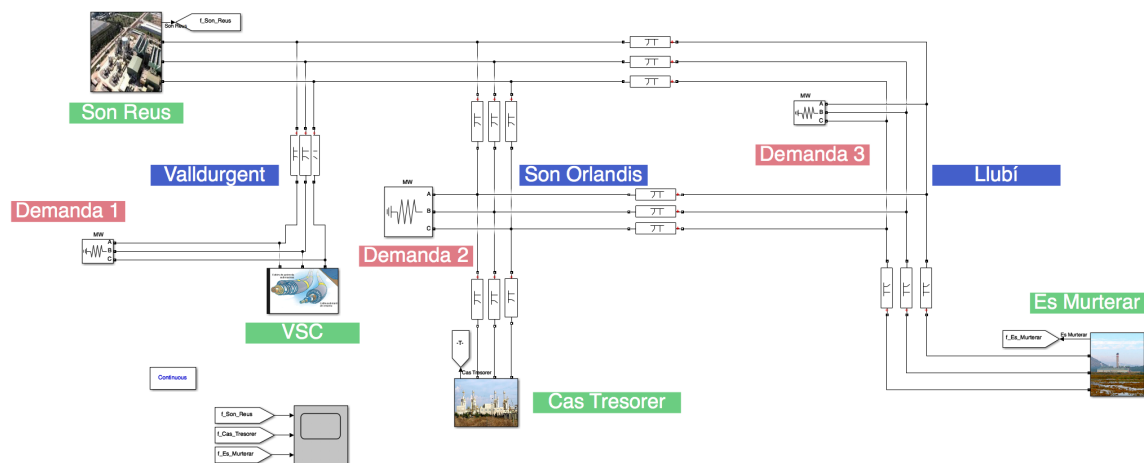


Figura 31: Esquema de la simulació del primer cas

Anàlisi	Escenari
Anàlisi 5.1	Canvis en el valor de la demanda
Anàlisi 5.2	Canvis de distribució en el consum
Anàlisi 5.3	Canvis de distribució de generació
Anàlisi 5.4	Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona
Anàlisi 5.5	Desconnexió de les centrals
Anàlisi 5.6	Canvis en el la $k$ del <i>droop</i>

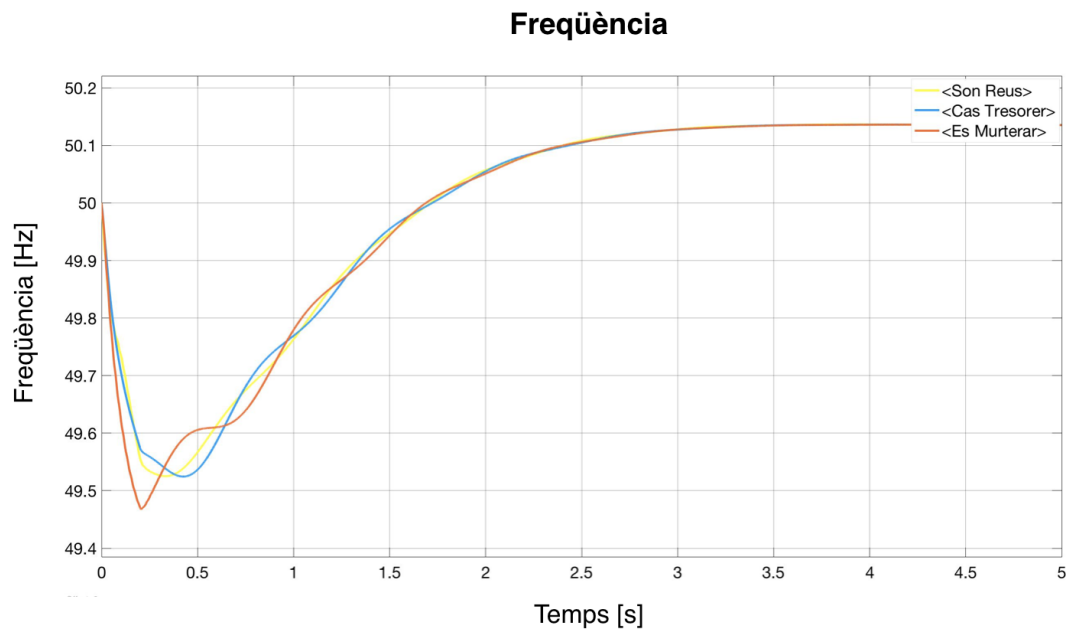
Taula 11: Anàlisis realitzats en el primer cas d'estudi

### 5.1 Canvis de la demanda

La primera situació estudiada és el canvi del valor total de la potència demandada de l'illa. Com s'introdueix en el Capítol 1, és molt important mantenir el balanç del flux de potència. Per tal d'assegurar el subministrament de la demanda, es generen 700 MW. En aquest estudi, s'executa tres cops el sistema variant el valor de la demanda, el primer cop la  $P_{demandada}=600$  MW, el segon cop  $P_{demandada}=700$  MW i finalment,  $P_{demandada}=800$  MW. En els gràfics 32, 34 i 36 s'observen els diferents comportaments de la freqüència respecte del temps al variar la demanda total.

$P_{demandada}$ [MW]	Imatges de referència
$P_{demandada}=600$	Figures 32 i 33
$P_{demandada}=700$	Figures 34 i 35
$P_{demandada}=800$	Figures 36 i 37

Taula 12: Variació de la demanda

Figura 32: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=600$  MW.

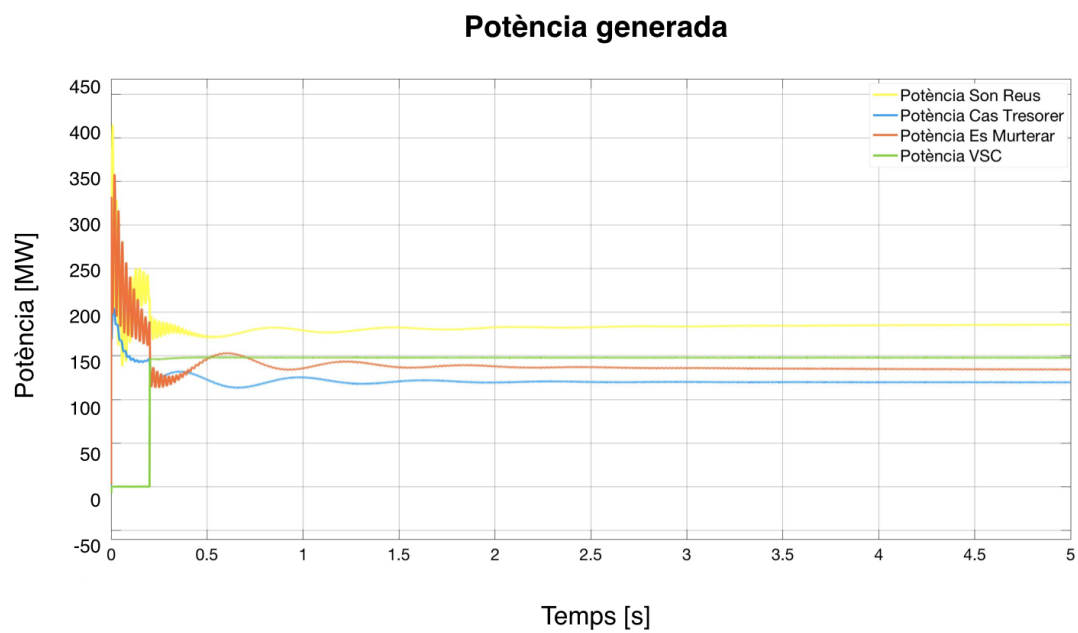


Figura 33: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=600$  MW.

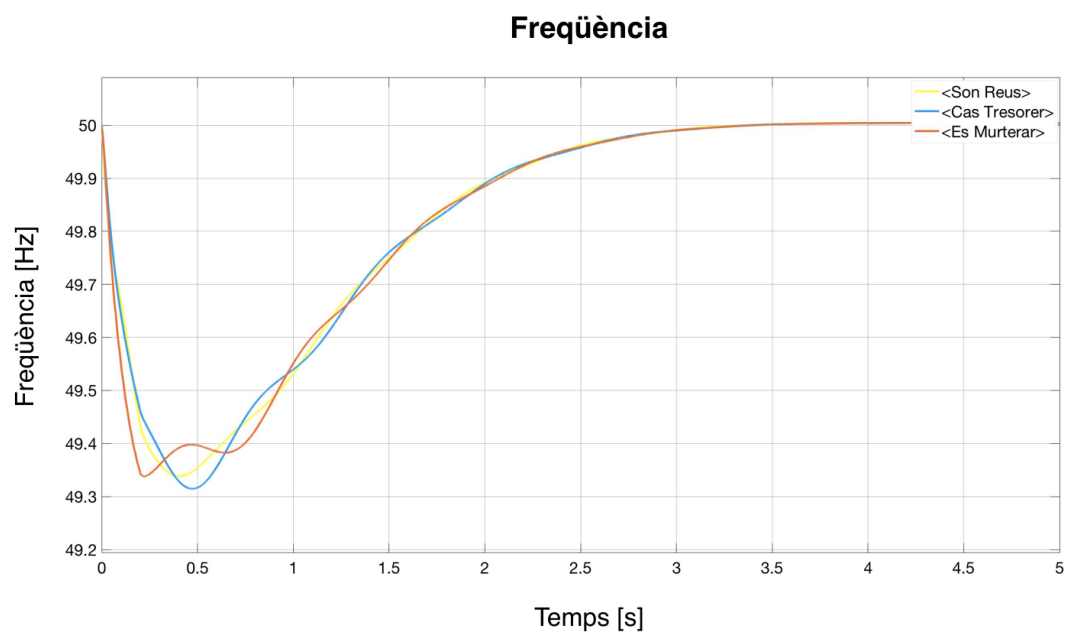


Figura 34: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=700$  MW.

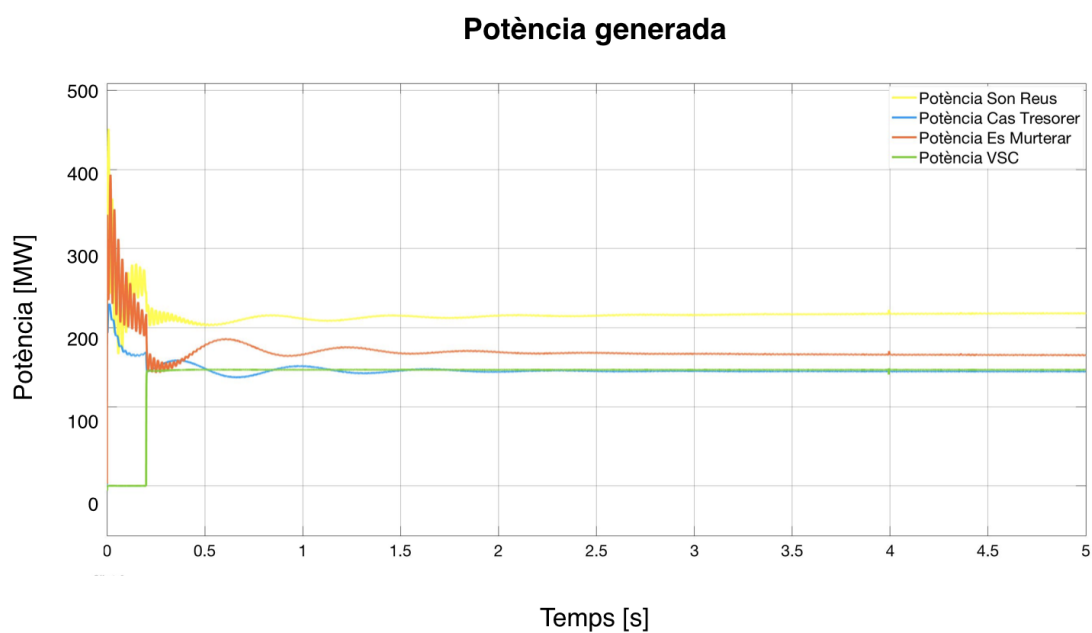


Figura 35: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=700$  MW.

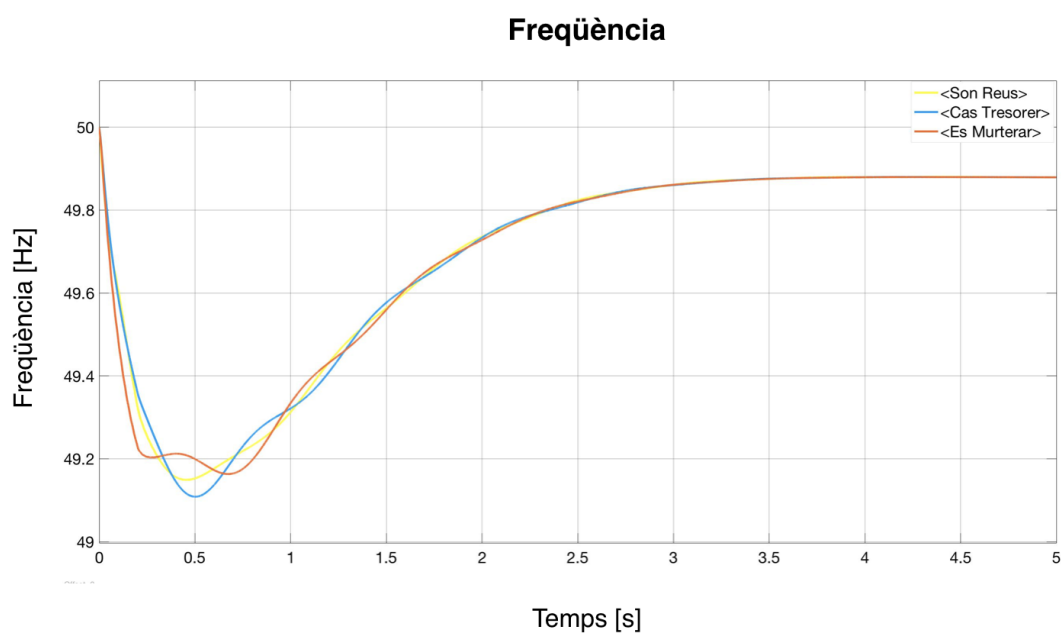


Figura 36: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=800$  MW.



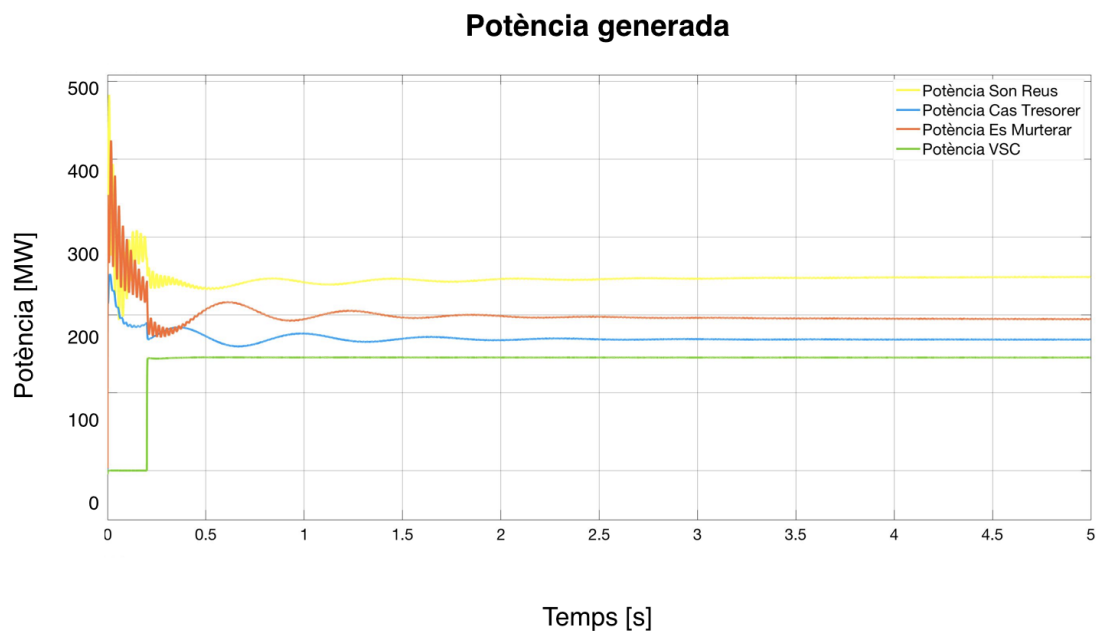


Figura 37: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=800$  MW.

Aquest primer anàlisi es simplement per veure que el sistema funciona correctament. Com s'observa a les Figures 33, 35 i 37, els generadors s'adapten a la demanda en els tres casos, proporcionant més o menys potència depenent del cas gràcies al control primari implementat. Per un altre costat, es produeix un  $\Delta f$  en els casos que la  $P_{generada} \neq 700$  MW, encara que aquest augment o disminució de la freqüència varia dins dels límits de funcionament establerts en la Taula 3.

D'aquest anàlisi també es pot extreure la inestabilitat del sistema fins a la incorporació del VSC (ja que com es defineix en el Capítol 4, no passa a actuar fins a  $t=0,2$ .)

## 5.2 Canvis de distribució del consum

La demanda del Sistema Elèctric de l'illa de Mallorca, varia per cada instant de temps. Com s'exposa a l'apartat 3.5, en aquest projecte s'agafa un valor de  $P_{demandada}=700$  MW per sobre de la potència màxima demandada a l'illa en un dia qualsevol per assegurar el subministrament elèctric a tota l'illa. Tot i així, es podria donar qualche cas en que la potència demandada fos major que la proposada o menor.

En aquest subcapítol s'estudia com es comporta el sistema al tenir variacions en la potència demandada. S'analitzen tres situacions, explicades a continuació.

El controlador utilitzat per la modelització de les turbines, explicat en l'apartat 4.2, s'autoregula depenent de la necessitat de generació de potència. Es a dir, si el sistema detecta que la demanda és major a la generació, els generadors proporcionen una potència major.

En el primer cas proposat, la D1 definida inicialment a 250 MW, passa a valer 500 MW durant els segons 4 i 6 de la simulació com s'observa a la Figura 38. A la Figura 40 s'aprecia com davant aquesta variació els generadors reaccionen proporcionant més potència per tal de complir amb el balanç de potència. Quan el valor de D1 torna al seu inicial, la potència generada també disminueix.

Pel que fa a la freqüència Figura 39, sofreix algunes desviacions quan es produeixen els canvis de demanda. Però, tot i que no es mantengui constant al llarg del temps surt de l'interval definit a la Taula 3 per a treballar de forma il·limitada.

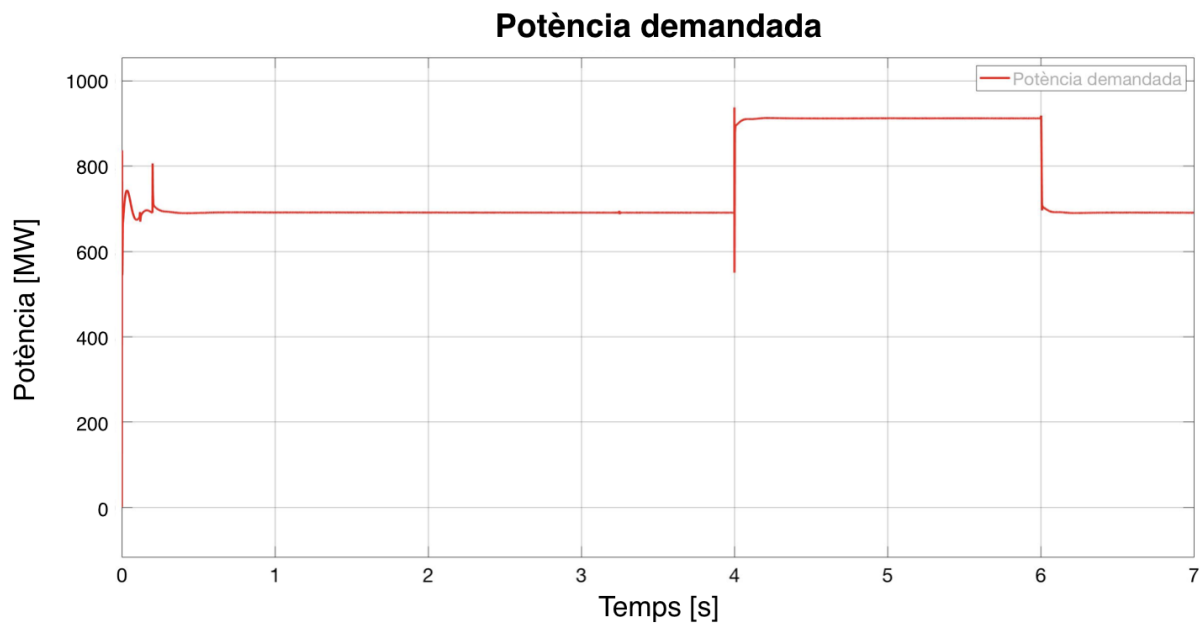


Figura 38: Variació de la potència demanada

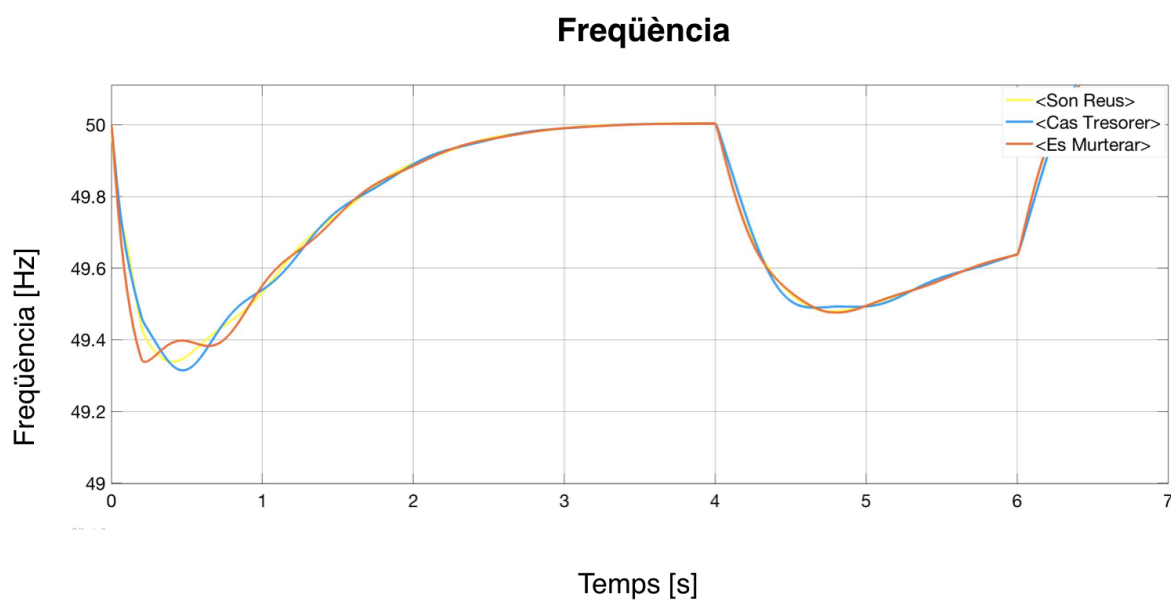


Figura 39: Variació de la freqüència al augmentar la demanda

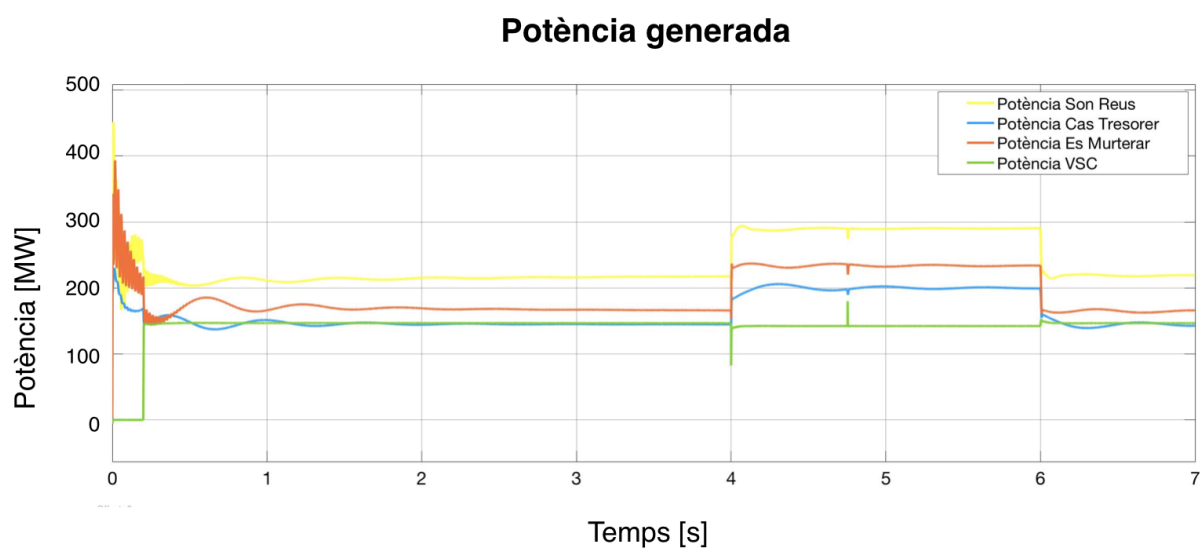


Figura 40: Variació de la potència generada

A continuació es realitza un anàlisi de la mateixa situació anterior juntament amb un control manual de la potència subministrada pel VSC. La potència demandada D1 torna a passar de valor 250 MW a 500 MW entre els segons 4 i 6 de la simulació Figura 41. A l'instant  $t = 4$  s s'incrementa el valor de la potència subministrada per el VSC de 150 MW a 400 MW, per tant la  $i_q^*$  passa a ser:

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{400 \cdot 10^6}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 220 \cdot 10^3} = 1484,54 \text{ A}$$

Com s'observa a la Figura 43. D'aquesta manera, s'aconsegueix que el  $\Delta f$  es menor que en la situació sense el control manual (Figura 42). Un cop la D1 torna al seu valor inicial, mitjançant el control manual, el VSC torna a subministrar 150 MW.

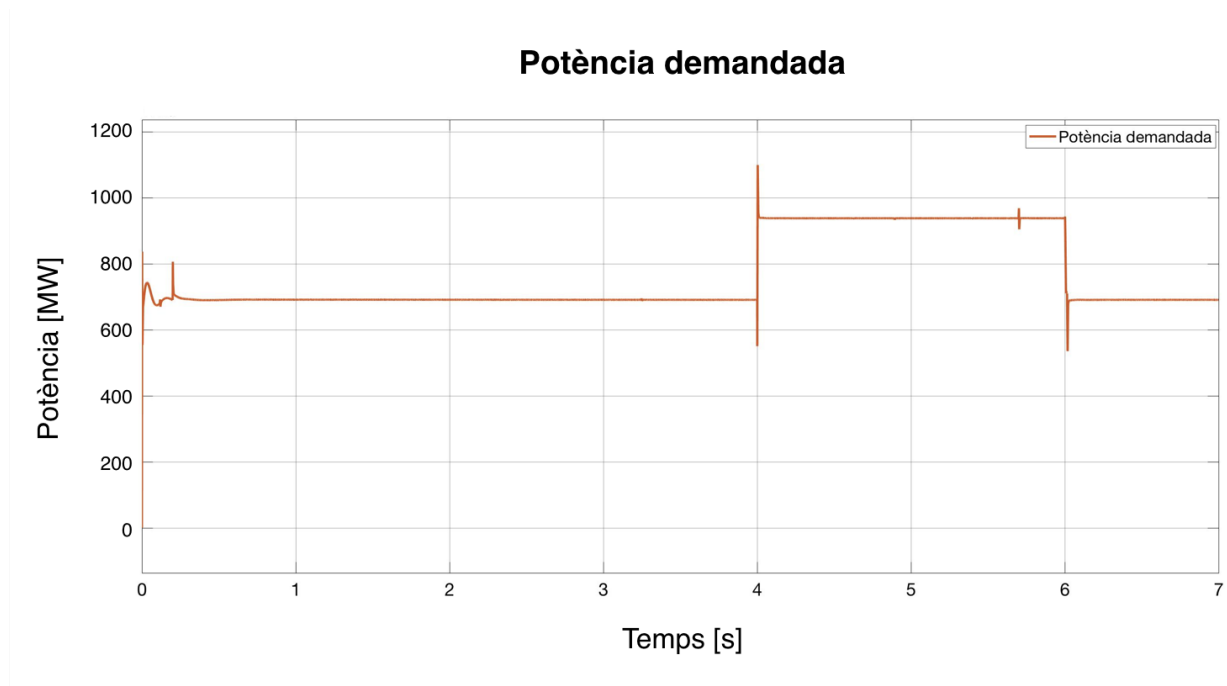


Figura 41: Variació de la potència demanada

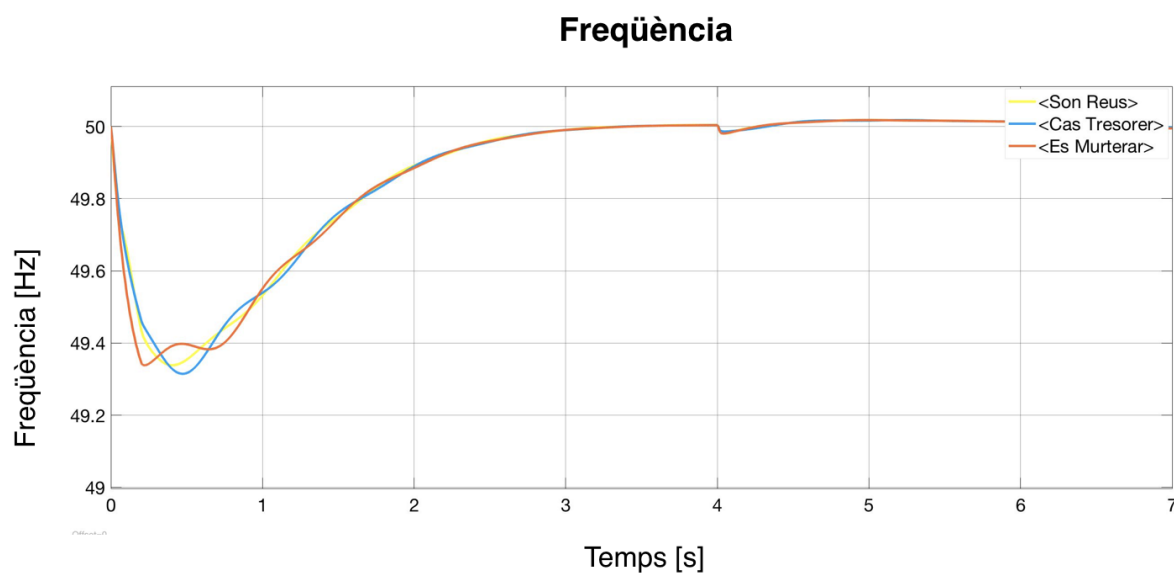


Figura 42: Variació de la freqüència al augmentar la demanda

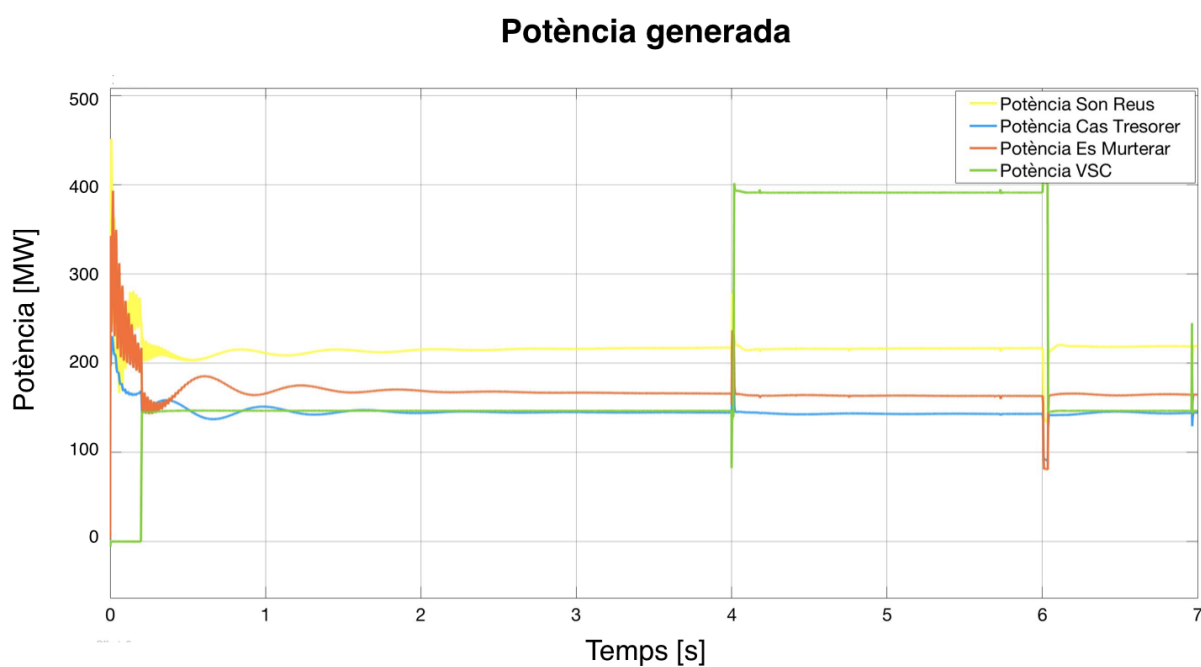


Figura 43: Variació de la potència generada

### 5.3 Canvis de distribució de generació

En aquest tercer estudi, s'analitza el comportament de la freqüència davant canvis en els valors de consigna de la potència de referència de les màquines síncrones. A  $t=4$  s, es canvia el valor de consigna de la potència generada per la central de Son Reus, passa de valer 1,63 a 2, aquest  $\Delta P_{generada}$  s'aprecia en la Figura 45, mentre que les altres dues centrals baixen el valor de la potència generada gràcies al control primari implementat. Davant l'increment de la freqüència es realitza manualment una disminució del valor de consigna de la potència generada de la central de Cas Tresorer, de 1,5 a 1 per tal de que el valor de la freqüència torni al seu nominal.

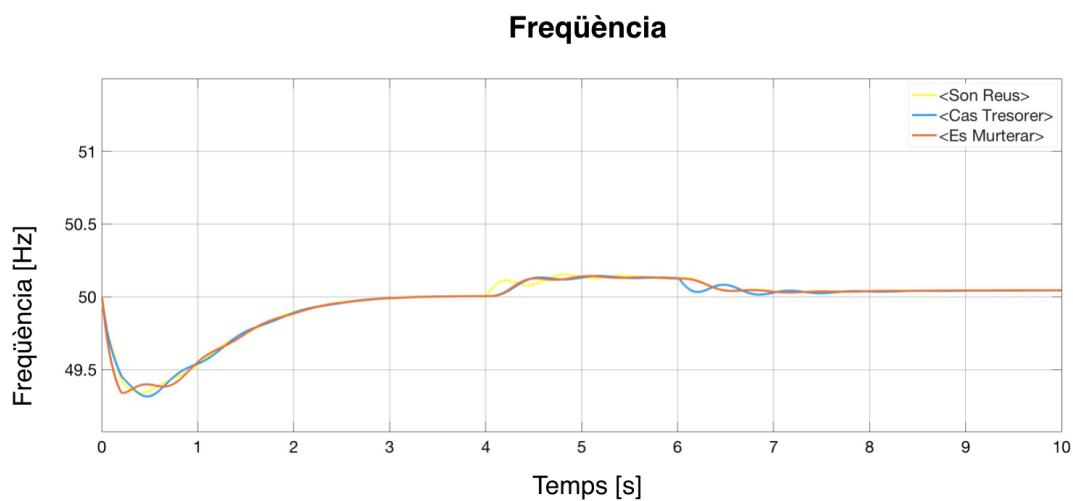


Figura 44: Variació de la freqüència al modificar el valor de consigna de la  $P_{generada}$

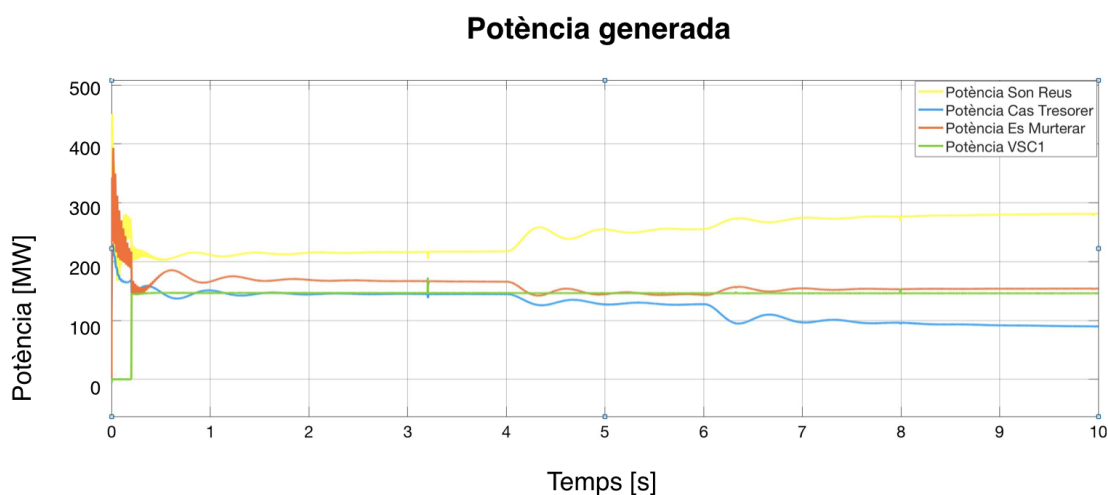


Figura 45: Variació de la freqüència al modificar el valor de consigna de la  $P_{generada}$

#### 5.4 Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona

En aquest quart anàlisi, s'incrementa la potència subministrada pel VSC de 150 MW a 250 MW, per tant la  $i_q^*$ :

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{250 \cdot 10^6}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 220 \cdot 10^3} = 927,84 \text{ A}$$

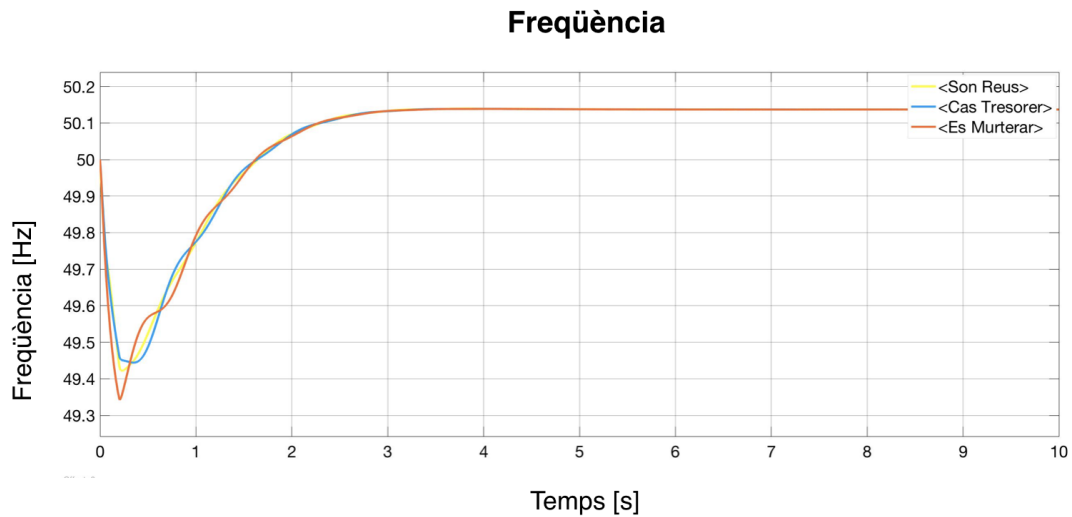


Figura 46: Variació de la potència davant l'increment de la part VSC

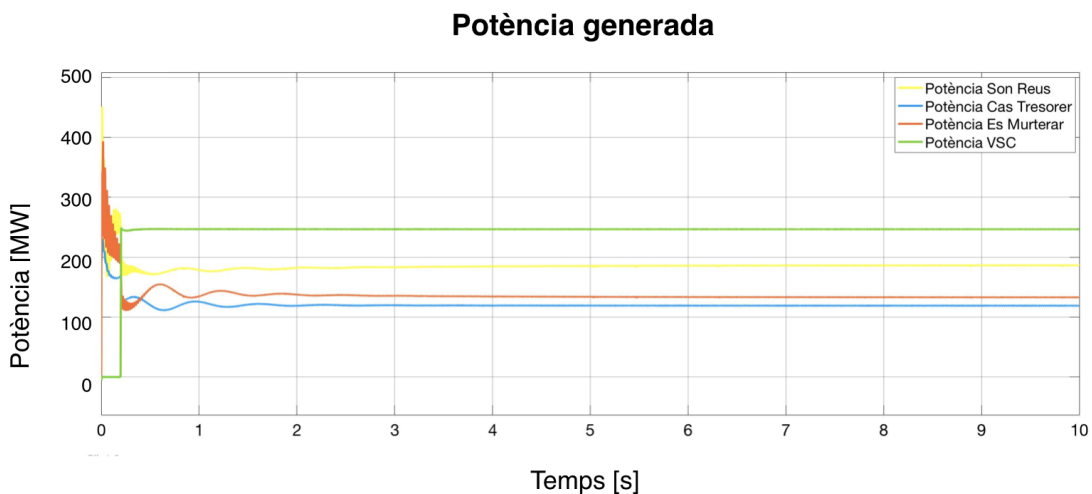


Figura 47: Potència subministrada

Una vegada més, es veu l'acció del control primari instaurats en les turbines de les centrals i els generadors autoregulen la potència generada. A banda d'aquest fet, presenta una gran similitud amb el primer anàlisi de la Figura 35.

## 5.5 Desconnexió de les centrals

En aquest apartat s'estudia el comportament del sistema al desconnectar cada una de les centrals elèctriques.

En les tres situacions, es desconnecta la central a la meitat de les simulacions. Com es veu a les Figures 49, 51 i 53 causa del control primari dissenyat, quan la potència generada per la central desconnectada passa a 0, aquesta diferencia de potència passa a ser generada per les altres dues màquines.

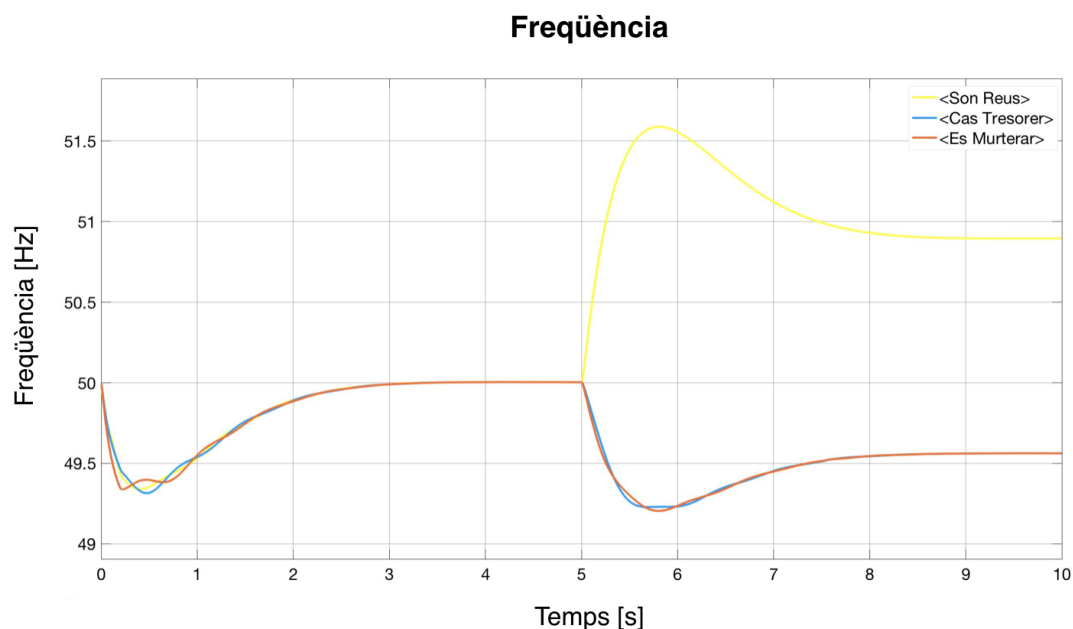


Figura 48: Comportament del sistema davant la desconnexió de la central de Son Reus



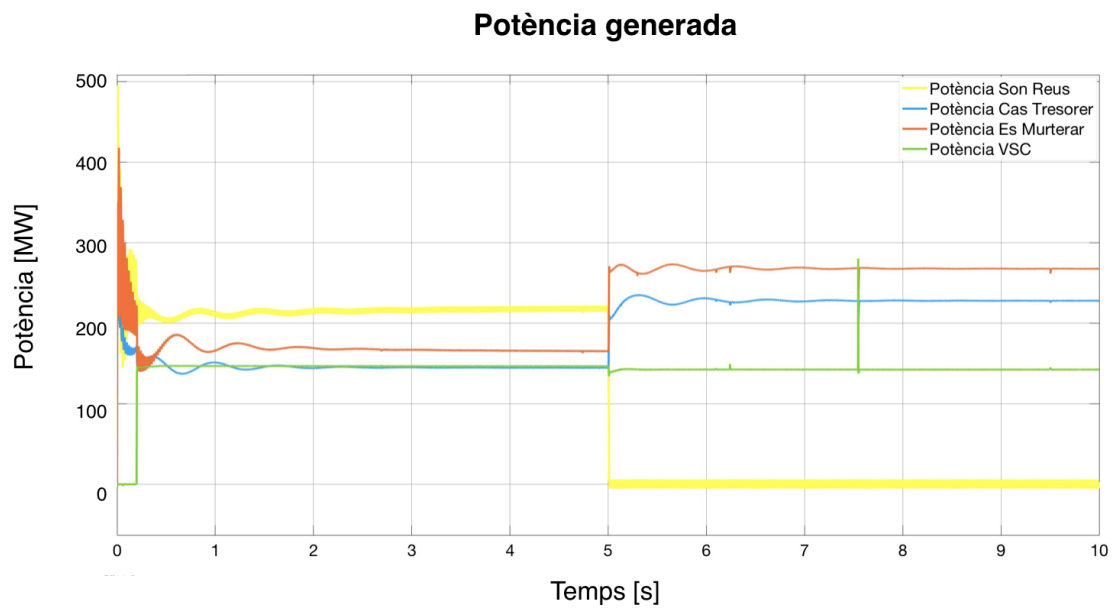


Figura 49: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus

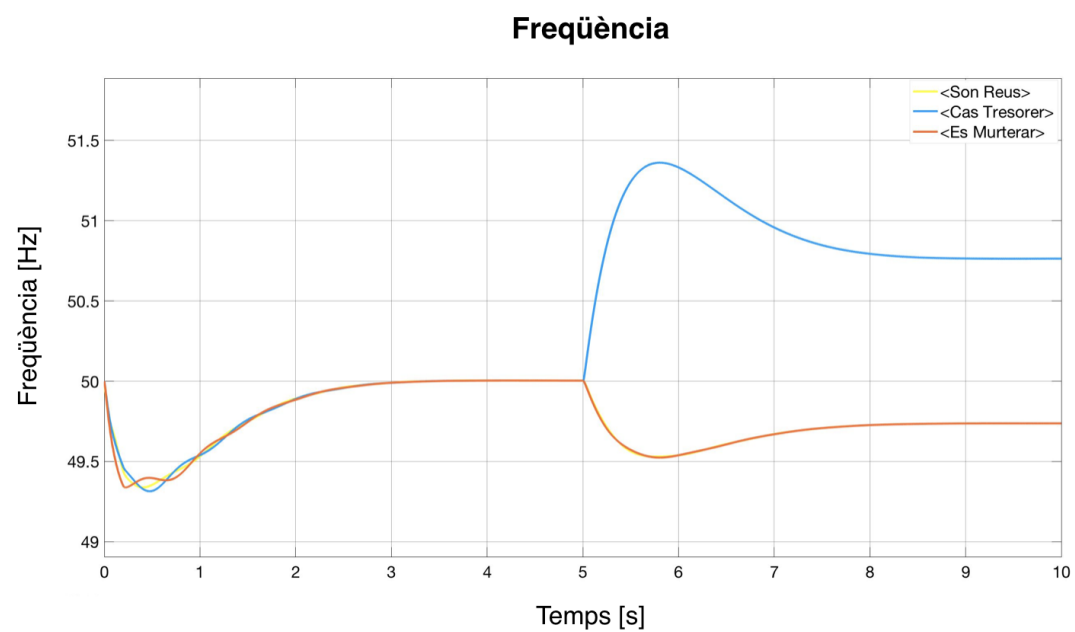


Figura 50: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer

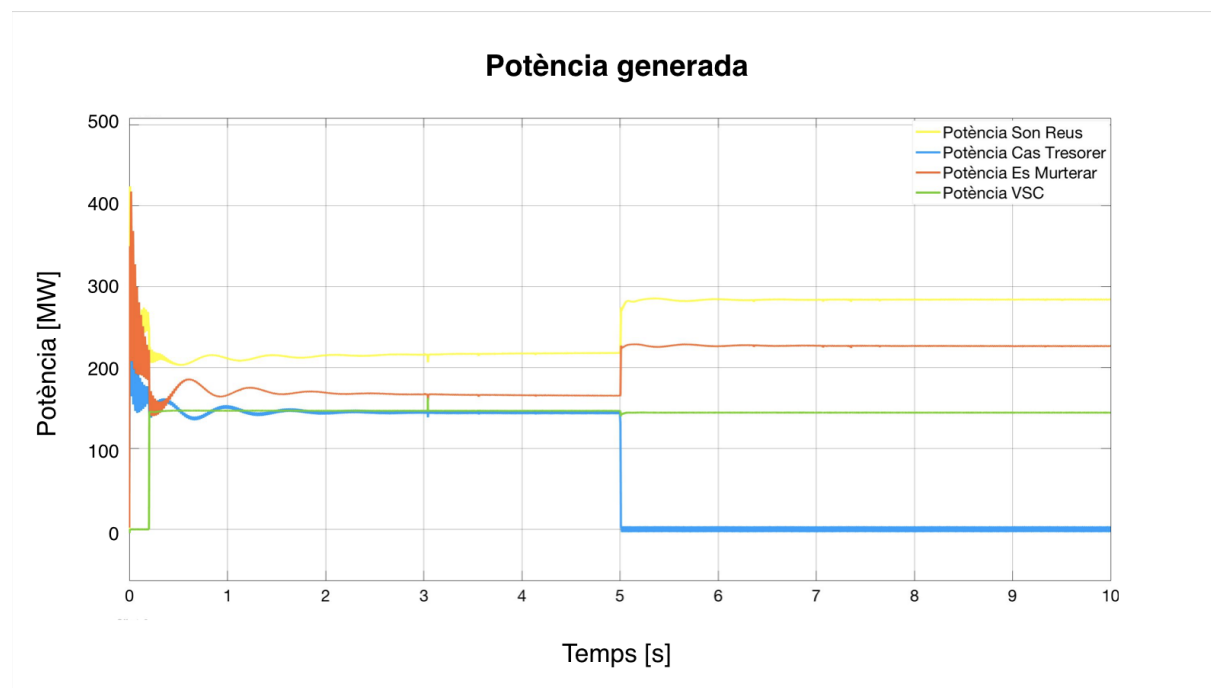


Figura 51: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Cas Tresorer

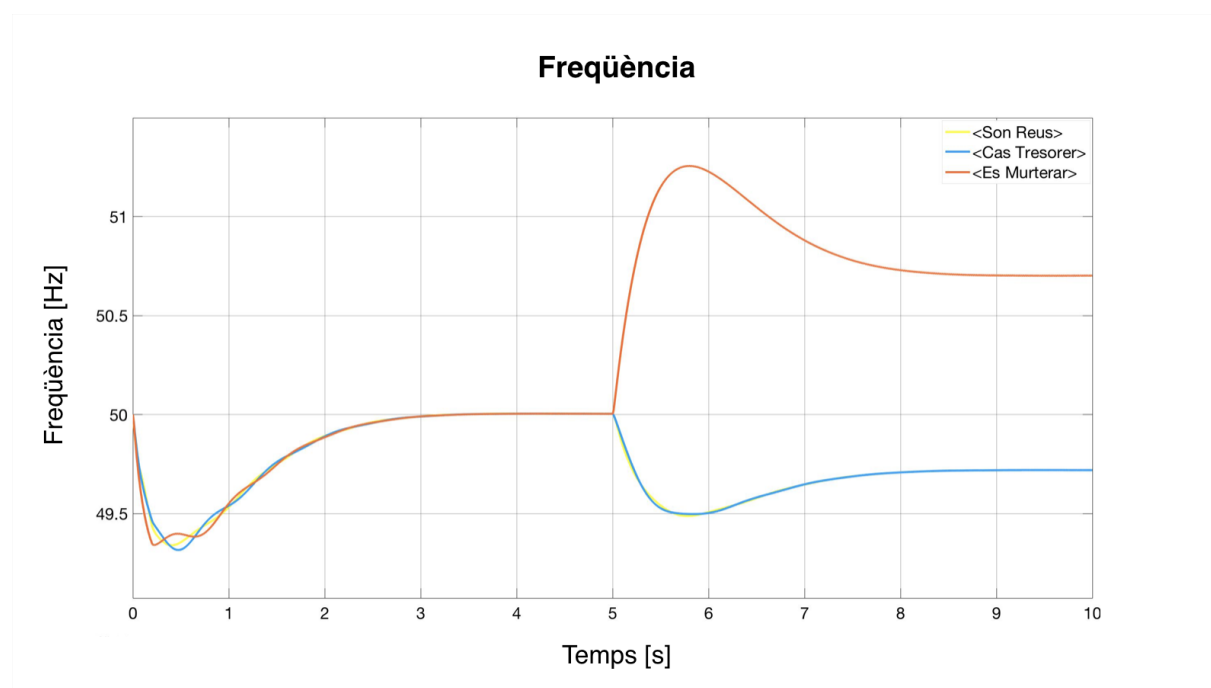


Figura 52: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Es Murterar

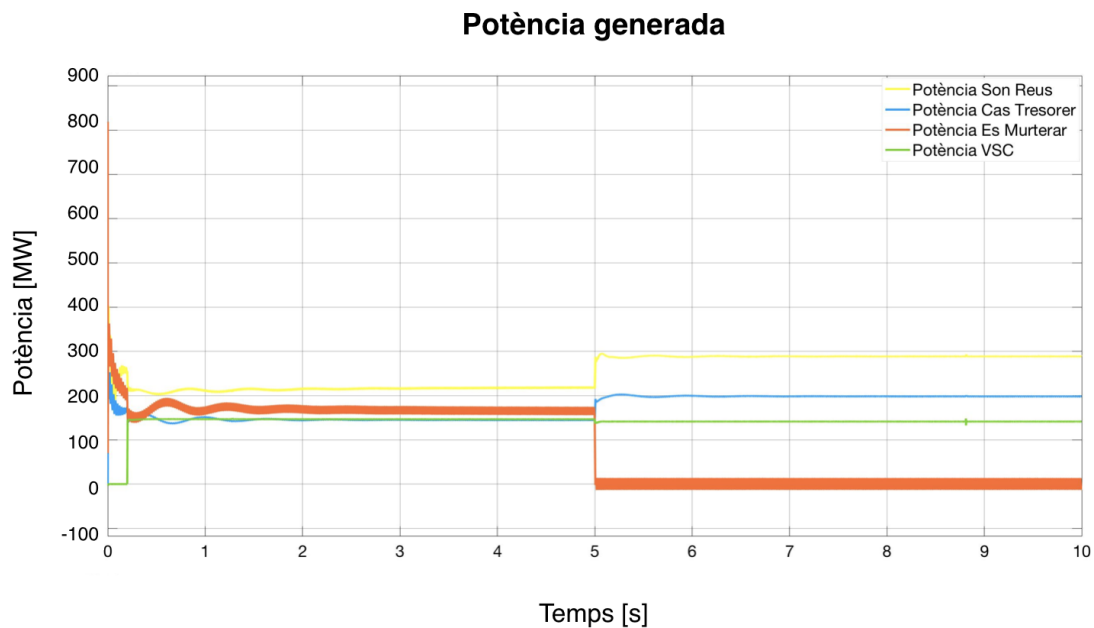


Figura 53: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Es Murterar

En els tres casos, el sistema funciona correctament, però al tenir menys inèrcia (al desconnectar una de les centrals) el sistema tendeix a ser més estable.

## 5.6 Canvis en la $k$ del *droop*

Per acabar amb l'estudi d'aquest primer cas, es realitzen una serie de simulacions variant el valor de la  $k$  del *droop*. En les següents Figures de la 54 a la 57 es veu la estabilitat de la freqüència depenent del valor de la  $k$ . En els gràfics s'observa com a major valor de la  $k$  el sistema és més inestable i la caiguda de la velocitat a l'arracada és major. Com s'explica en el Capítol 4 en aquest treball per la resta de simulacions s'utilitza  $k=0,05$ .

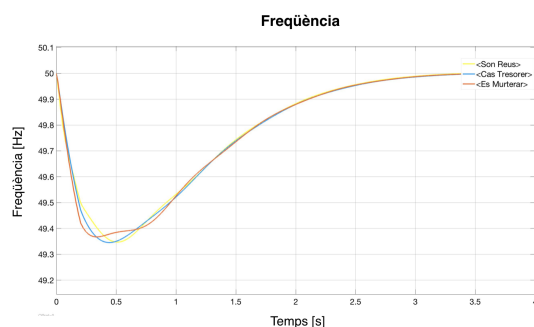


Figura 54:  $k=0,01$

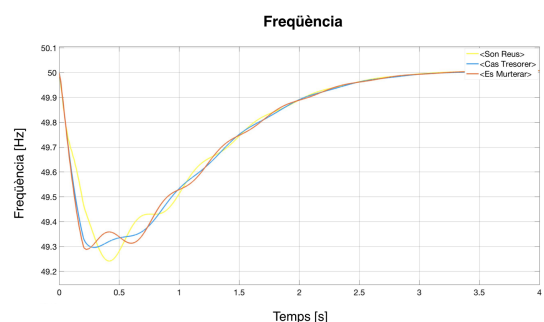


Figura 55:  $k=0,05$

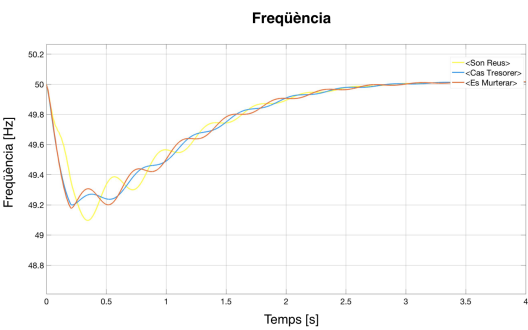


Figura 56:  $k=0,1$

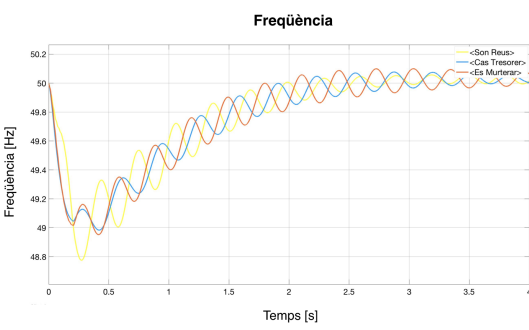


Figura 57:  $k=0,2$

## 6 Segon cas d'estudi: situació hipotètica de la xarxa elèctrica de Mallorca

En aquest segon estudi, es proposa una situació hipotètica en la qual es decideix eliminar la central situada a Alcúdia, la de Es Murterar, i posar una segona interconnexió Península-Mallorca en el seu lloc. S'elegeix aquesta situació ja que en els pròxims anys la central de Es Murterar deixarà de funcionar, en 2020 es tancaran dos dels seus 4 cicles i cap a l'any 2025 deixarà de funcionar completament. Amb l'objectiu, una vegada més, de subministrar tota la potència demandada també existeix un projecte, similar al *Rómulo*, que es basa en la realització d'una segona interconnexió entre la Península i l'illa.

Aquest segon estudi es fa com a anàlisi complementari del treball per tal de comparar les diferències entre ambdós casos.

Es proposa un cas en el que cada un dels VSC aporten una potència de 150 MW, és per aquest motiu que als gràfics les potències subministrades pels dos estan superposades. S'empren els valors de potència generada de la Taula 2 i els respectius ajustaments dels valors de la potència de referència explicats en la Taula 6.

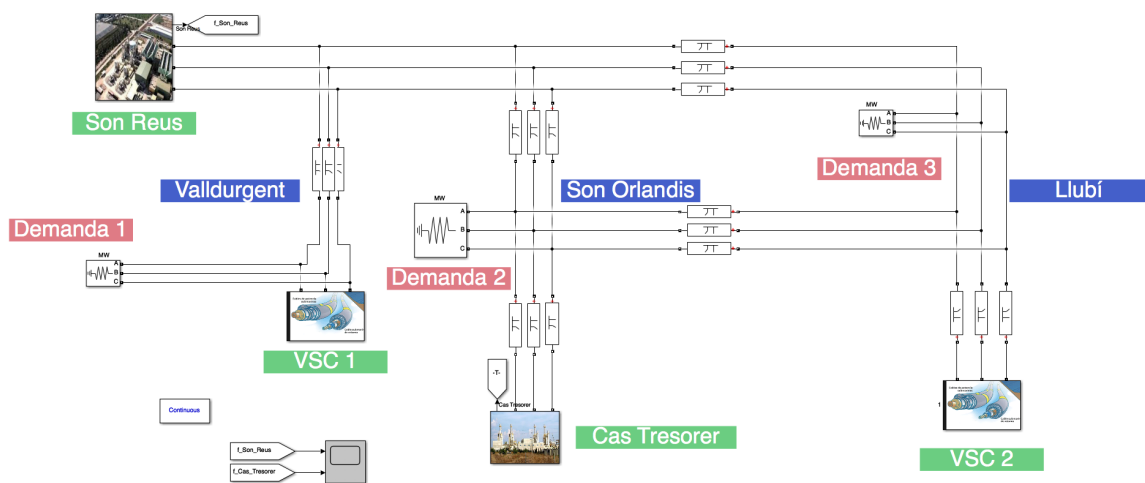


Figura 58: Esquema de la simulació del segon cas

Font:Elaboració pròpia, Rosa Gil

En aquest cas d'estudi es plantegen les mateixes situacions que en el primer cas exposades en la Taula 13.

Anàlisi	Escenari
Anàlisi 6.1	Canvis en el valor de la demanda
Anàlisi 6.3	Canvis de distribució en el consum
Anàlisi 6.3	Canvis de distribució de generació
Anàlisi 6.4	Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona
Anàlisi 6.5	Desconnexió de les centrals
Anàlisi 6.6	Canvis en la $k$ del <i>droop</i>

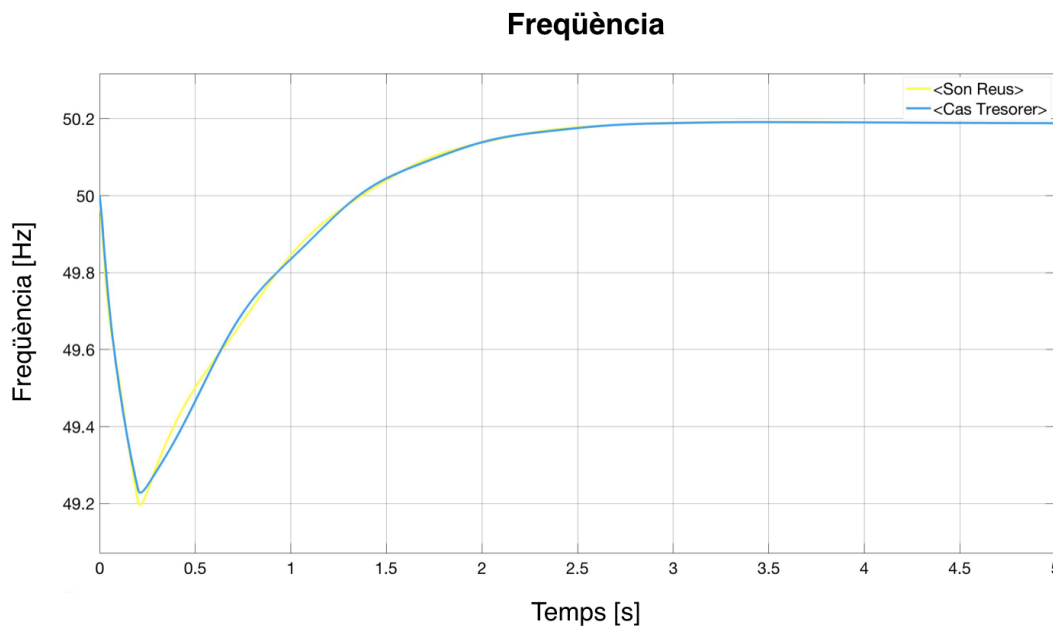
Taula 13: Anàlisis realitzats en el segon cas d'estudi

## 6.1 Canvis de distribució de demanda

Aquest primer anàlisi, és molt similar al realitzat en la subsecció 5.1. Els casos d'estudi són els mateixos per veure com es comporta en aquesta situació la freqüència i les potències generades en per les diferents màquines.

$P_{demandada}$ [MW]	Imatge de referència
$P_{demandada}=600$	Figures 59 i 60
$P_{demandada}=700$	Figures 61 i 62
$P_{demandada}=800$	Figures 63 i 64

Taula 14: Variació de la demanda

Figura 59: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=600$  MW.

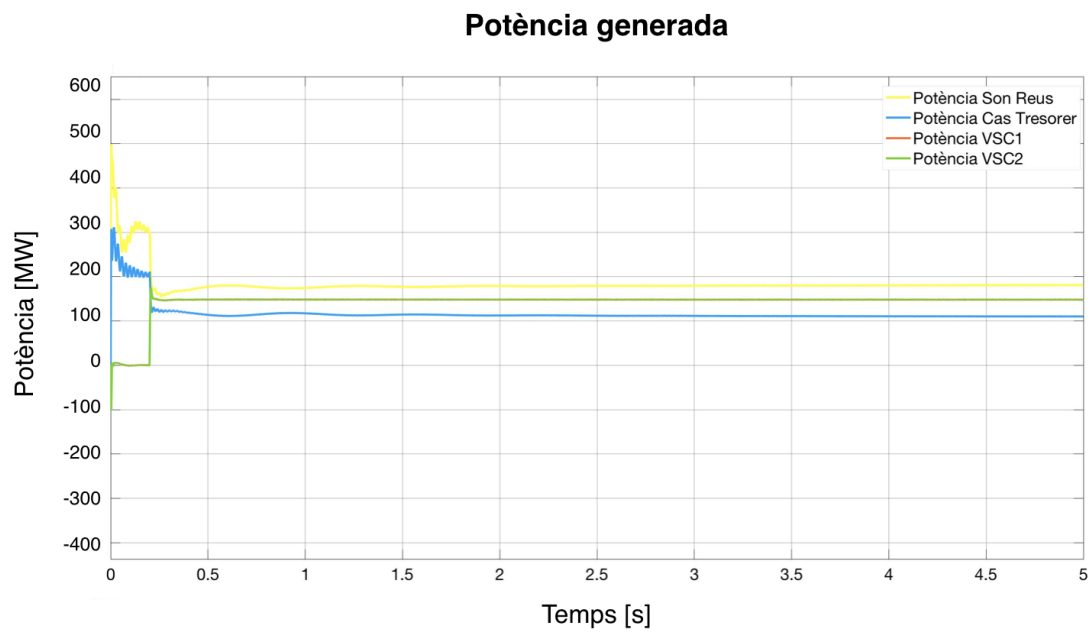


Figura 60: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=600$  MW.

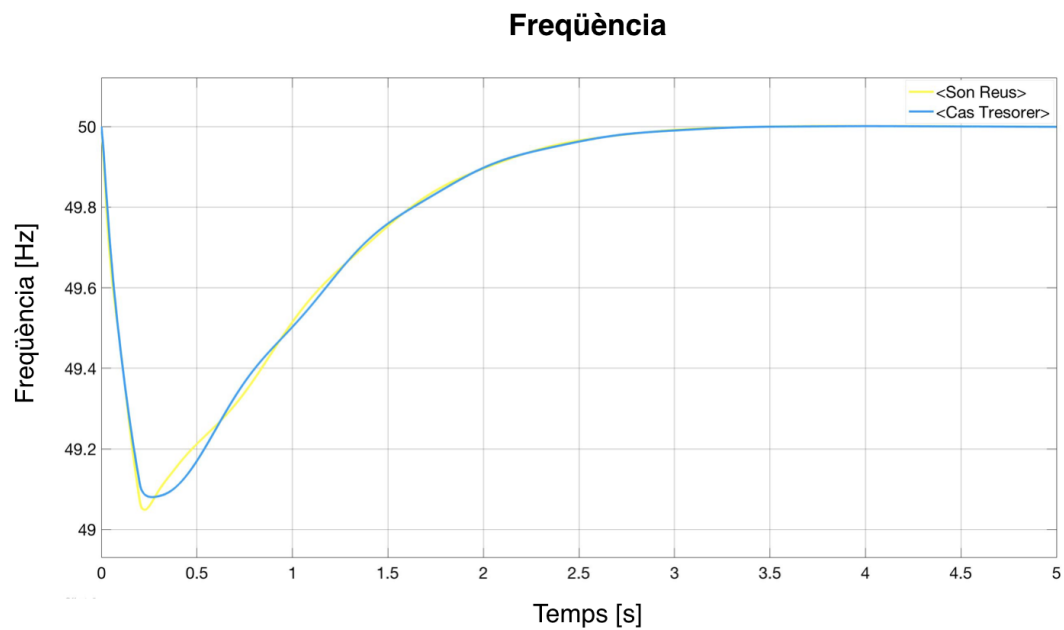


Figura 61: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=700$  MW.

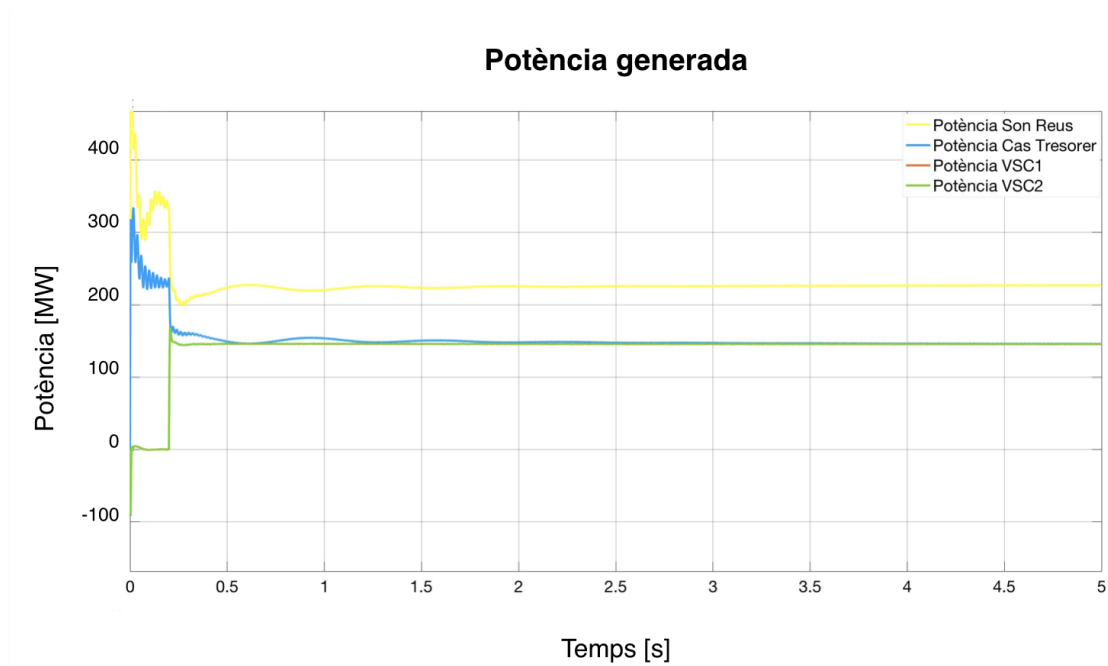


Figura 62: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=700$  MW.

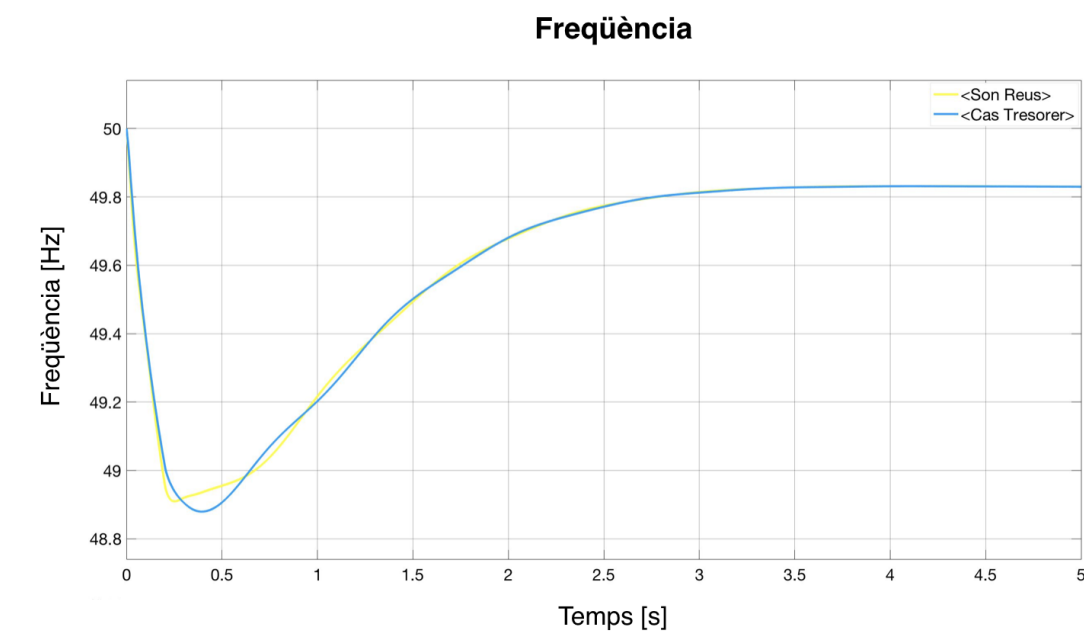


Figura 63: Variació de la freqüència del sistema quan la  $P_{demandada}=800$  MW.



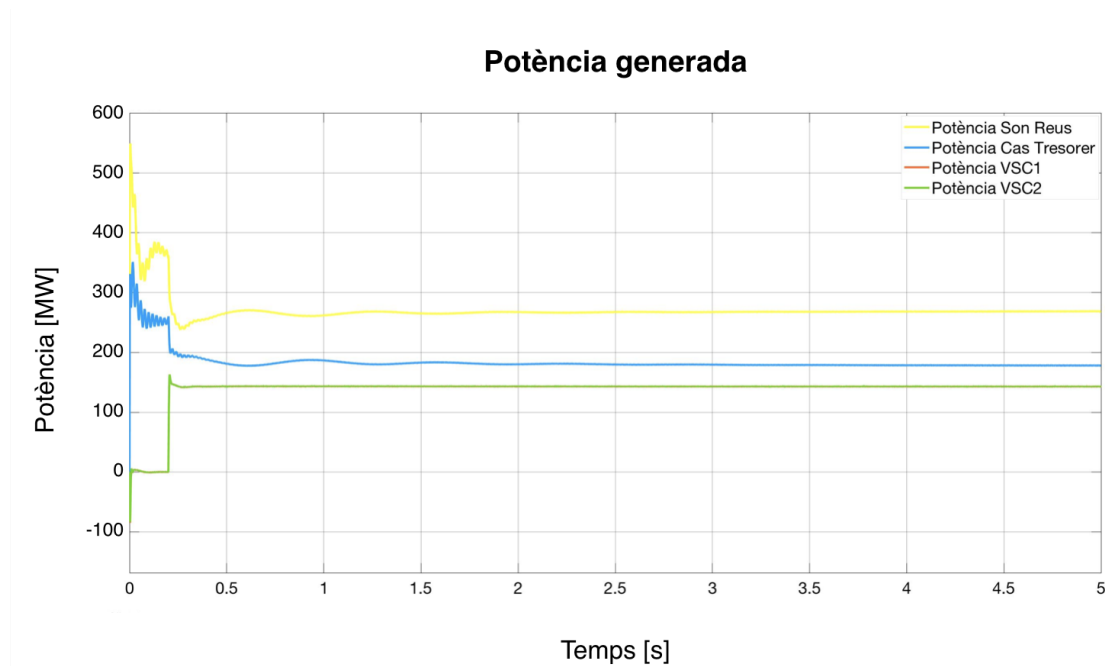


Figura 64: Variació de la potència del sistema quan la  $P_{demandada}=800$  MW.

Aquest primer anàlisi torna a ser per comprovar el correcte funcionament del sistema i l'estabilitat del mateix. Si comparam el comportament de la freqüència respecte el primer cas d'estudi, la conclusió principal que es treu és que a menys aportació síncrona el sistema és una mica més inestable, cosa que es reflecteix en que la  $\Delta f$  en el segon cas és major que en el primer.

## 6.2 Canvis de distribució del consum

Es realitza el mateix estudi que al apartat 5.2, on la D1 definida inicialment a 250 MW, passa a valer 500 MW durant els segons 4 i 6 de la simulació com s'observa a la Figura 65. A la Figura 67 s'aprecia com davant aquesta variació els generadors reaccionen proporcionant més potència per tal de complir amb el balanç de potència. Quan el valor de D1 torna al seu inicial, la potència generada també disminueix.

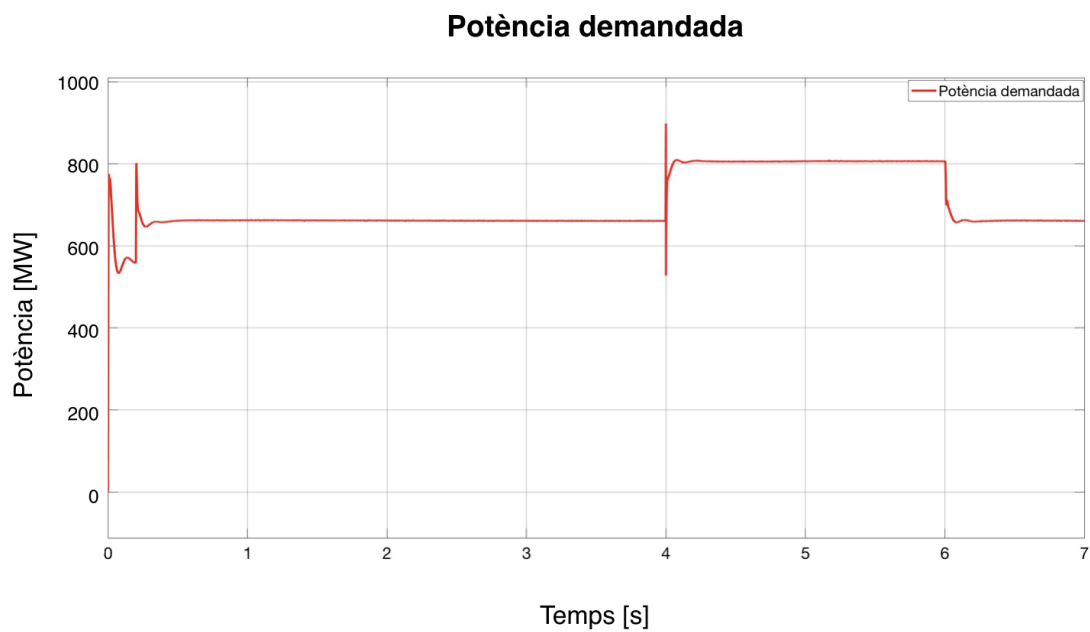


Figura 65: Variació de la freqüència davant una variació de la demanda.

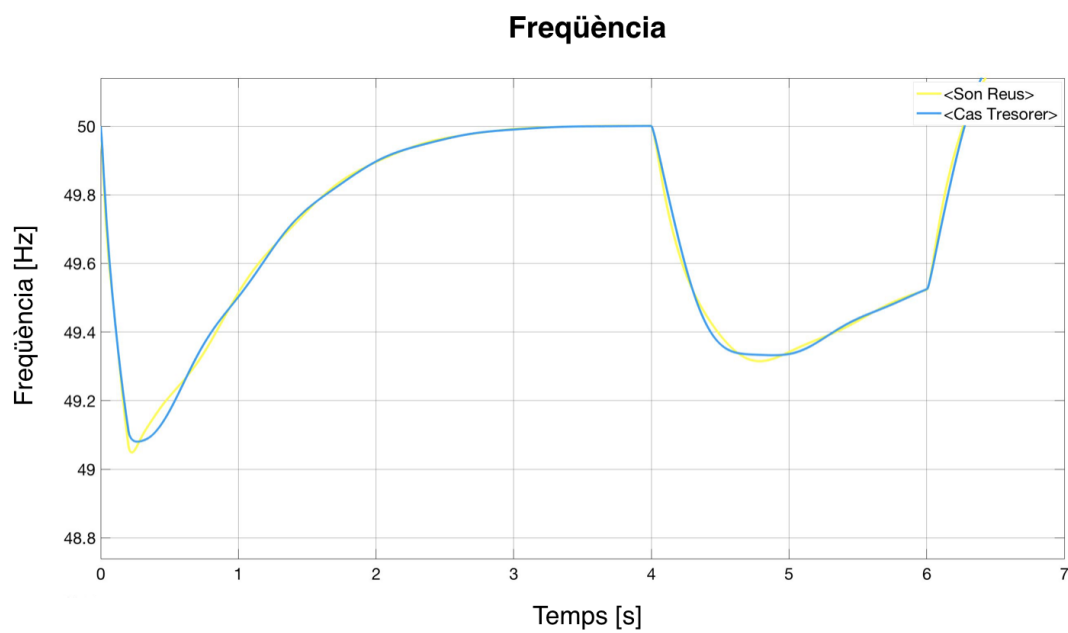


Figura 66: Variació de la demanda del sistema.

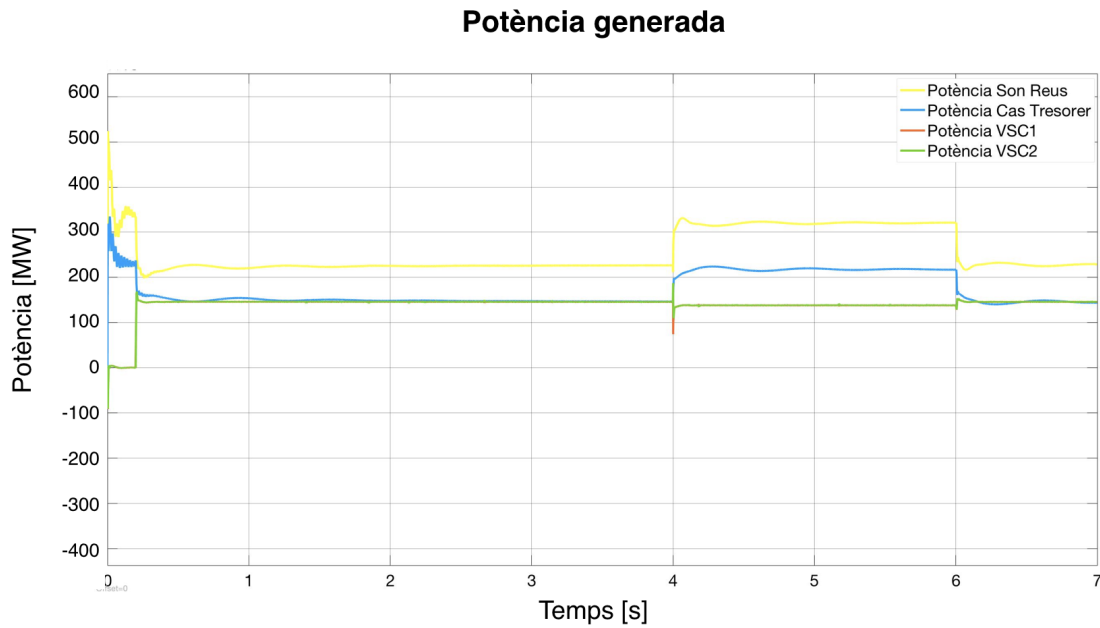


Figura 67: Variació de la potència subministrada davant una variació de la demanda.

Com s'observa a la Figura 67, gràcies al control primari implementat en els generadors, la potència generada pels mateix es regula depenent de la demanda. En aquest segon cas d'estudi, al substituir la central de Es Murterar per una segona connexió HVDC comença a augmentar la necessitat de implementar també un control primari als VSC per tal que subministrin més o menys potència depenent de la demanda.

La Figura 68 mostra el controlador que s'implementa als dos VSC d'aquest segon sistema. La  $\omega_e$  es compara amb una de referència calculada com:

$$\omega_{ref} = 2\pi f$$

On  $f$  és la freqüència del sistema, 50 Hz. Aquesta diferència proporciona un  $\Delta P$  instantani i amb l'equació (18) es calcula l'increment del  $i_q^*$  que es suma al corrent definit al *current loop*. La potència nominal del VSC és de 500 MW, així que el control està acotat de la següent manera:

$$\frac{3}{2} i_q^* v_{zq} + \frac{3}{2} \Delta i_q^* v_{zq} \leq 500 \text{ MW}$$

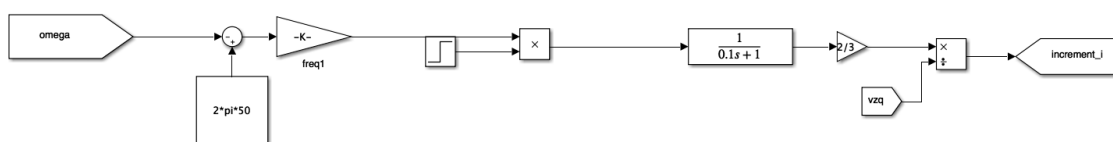


Figura 68: Control primari implementat als VSC

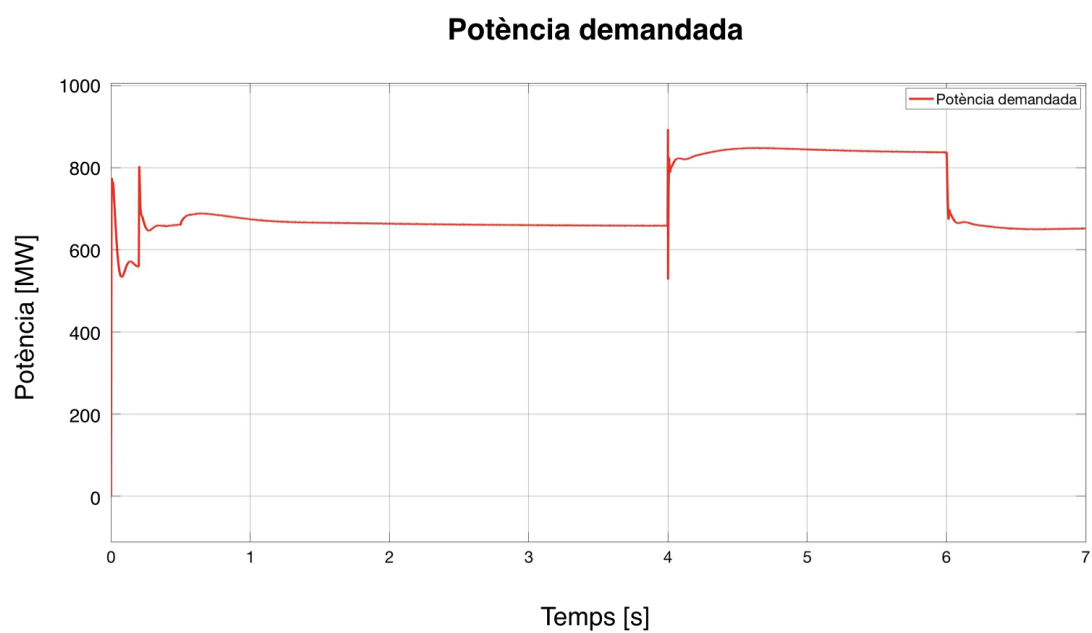


Figura 69: Potència demandada

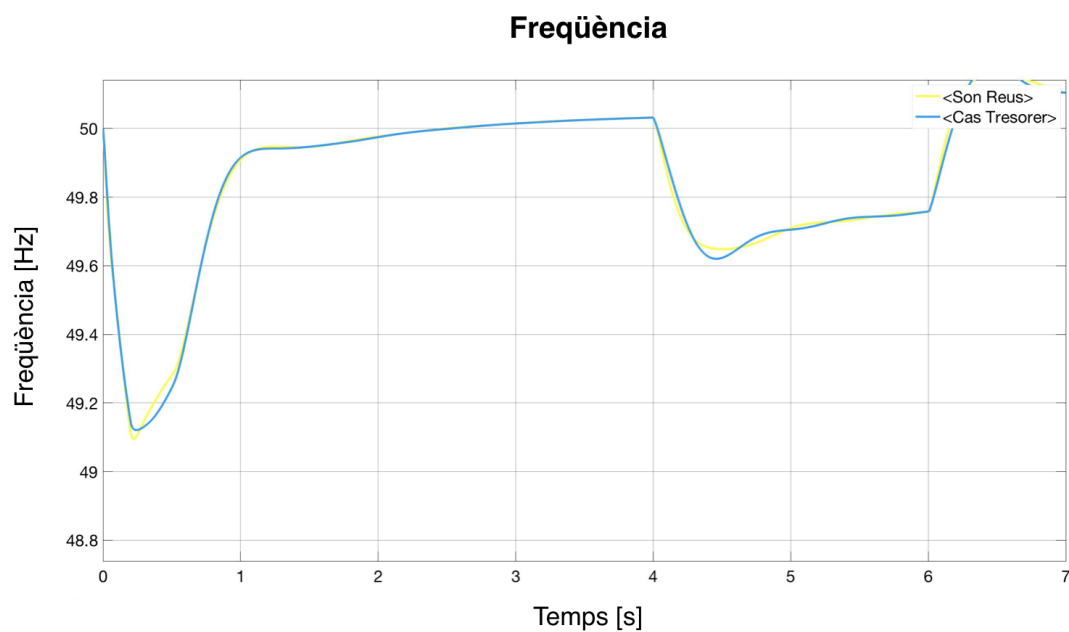


Figura 70: Variació de la freqüència del sistema

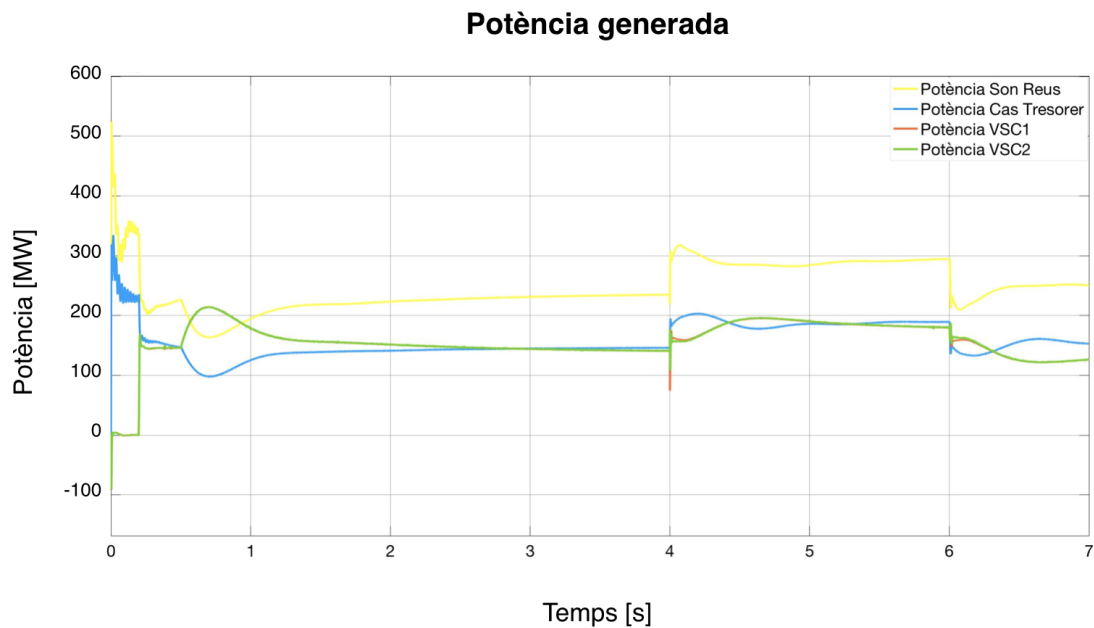


Figura 71: Potència generada del sistema

Si es compara el comportament de la freqüència representat en les Figures 65 -sense control primari en el VSC- i 70 -amb control primari al VSC- s'observen dues diferències principals. La primera és l'estabilització del sistema és més ràpida en el segon cas, en pràcticament un segon ha arribat al valor nominal de la freqüència. La segona, és la caiguda de velocitat al incrementar la potència demandada, en el segon cas aquesta  $\Delta f$  és menor que en el primer, el sistema és més estable gràcies al control implementat als VSC.

### 6.3 Canvis de distribució de generació

En aquest tercer estudi, s'analitza el comportament de la freqüència davant canvis en els valors de consigna de la potència de referència de les màquines síncrones, amb la implementació del controlador *droop*, presentat al subcapítol . A  $t=4$  s, es canvia el valor de consigna de la potència generada per la central de Son Reus, passa de valer 1,63 a 2, aquest  $\Delta P_{generada}$  s'aprecia en la Figura 73, mentre que les altres dues centrals baixen el valor de la potència generada gràcies al control primari implementat. Davant l'increment de la freqüència es realitza manualment una disminució del valor de consigna de la potència generada de la central de Cas Tresorer, de 1,5 a 1 per tal de que el valor de la freqüència torni al seu nominal.

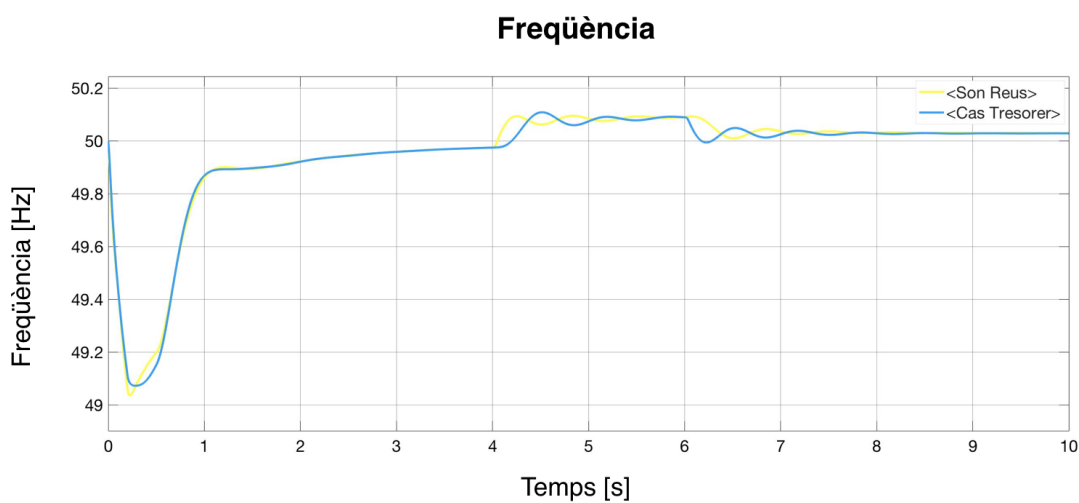


Figura 72: Variació de la freqüència davant una variació de la demanda.

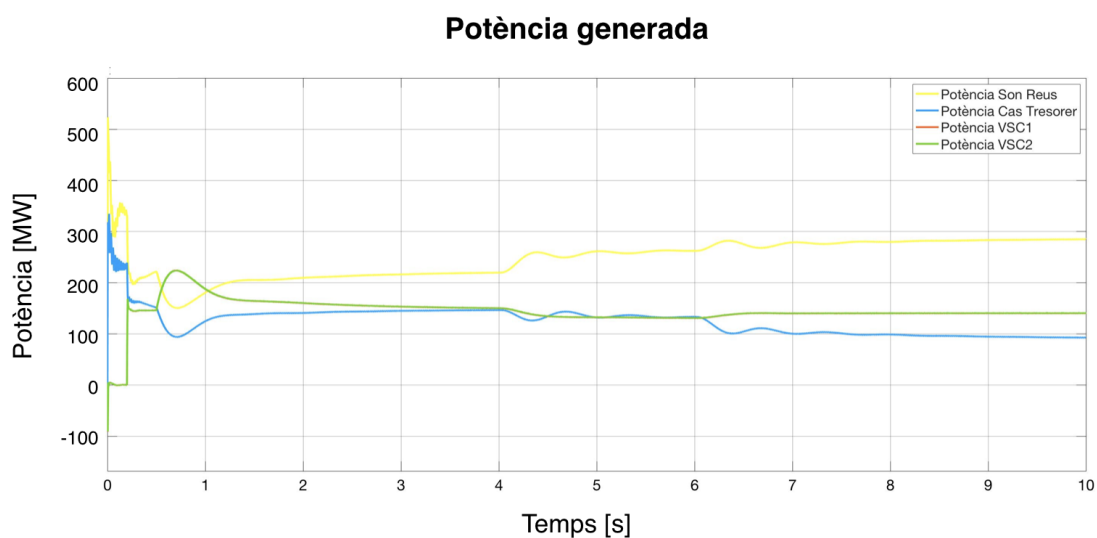


Figura 73: Variació de la freqüència davant una variació de la demanda.

#### 6.4 Increment de l'aportació del VSC i reducció de la part síncrona

En aquest quart anàlisi, s'incrementa la potència subministrada pels VSCs, es plantegen els dos escenaris de la Taula 15, en aquest anàlisi també s'implementa el control del VSC.

Cas	$P_{generadaVSC1}$ [MW]	$P_{generadaVSC2}$ [MW]	Imatges de referència
1	200	150	Figures 74 i 75
2	250	250	Figura 76 i 77

Taula 15: Casos de increment de la part del VSC

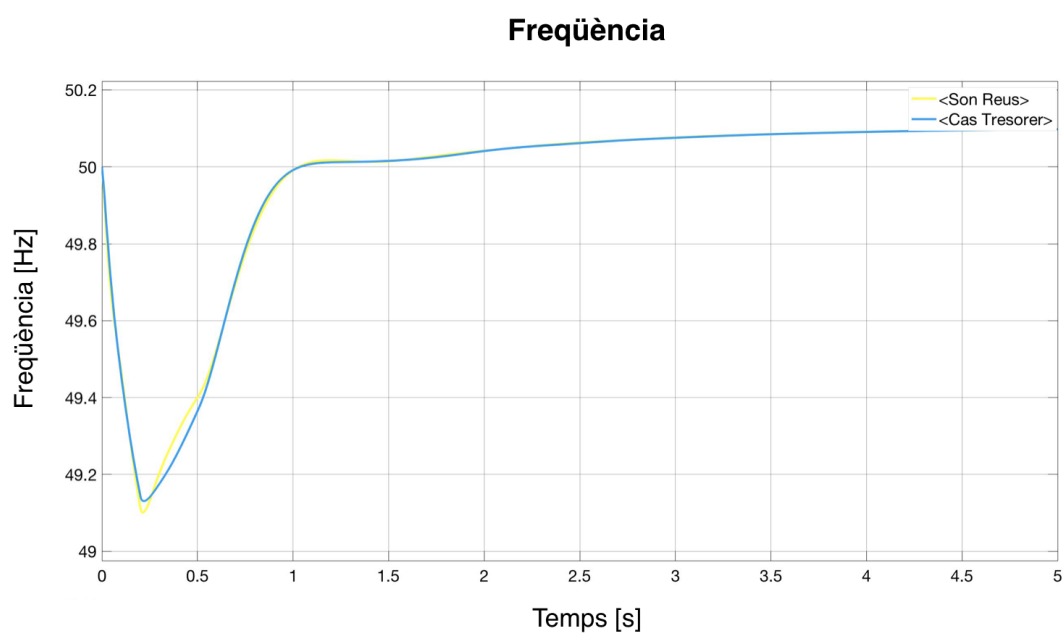


Figura 74: Increment de la potència subministrada pel VSC1

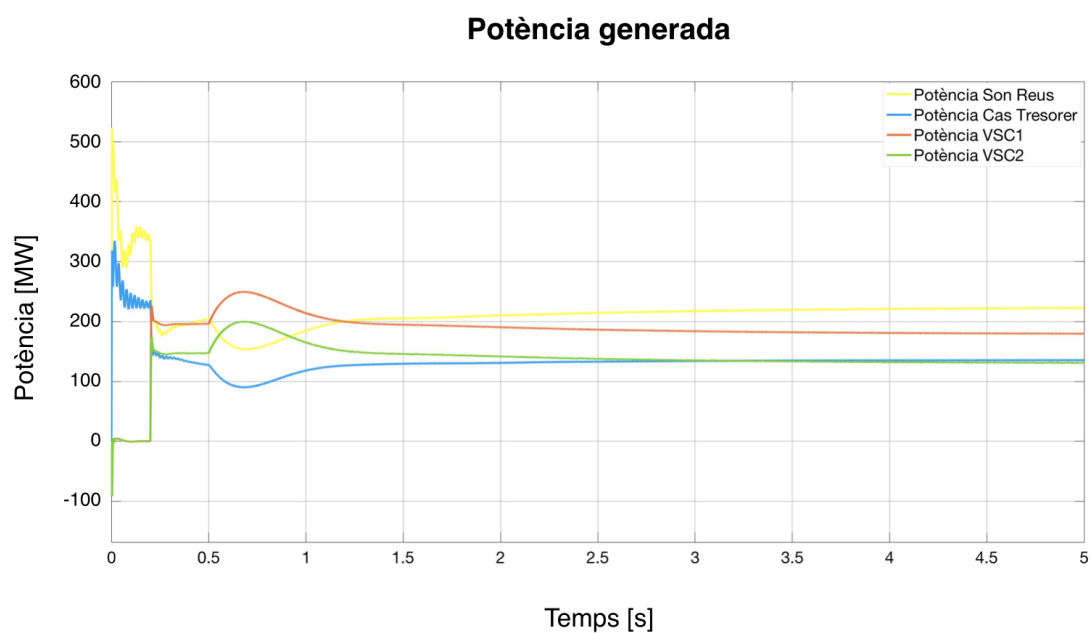


Figura 75: Increment de la potència subministrada pel VSC1

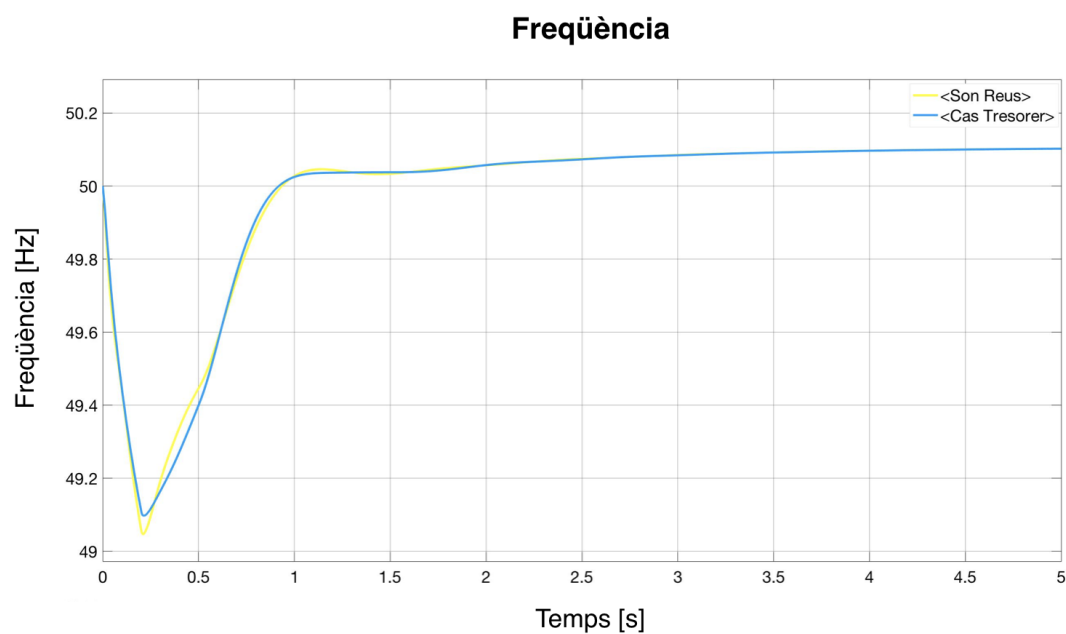


Figura 76: Increment de la potència subministrada pels dos VSC



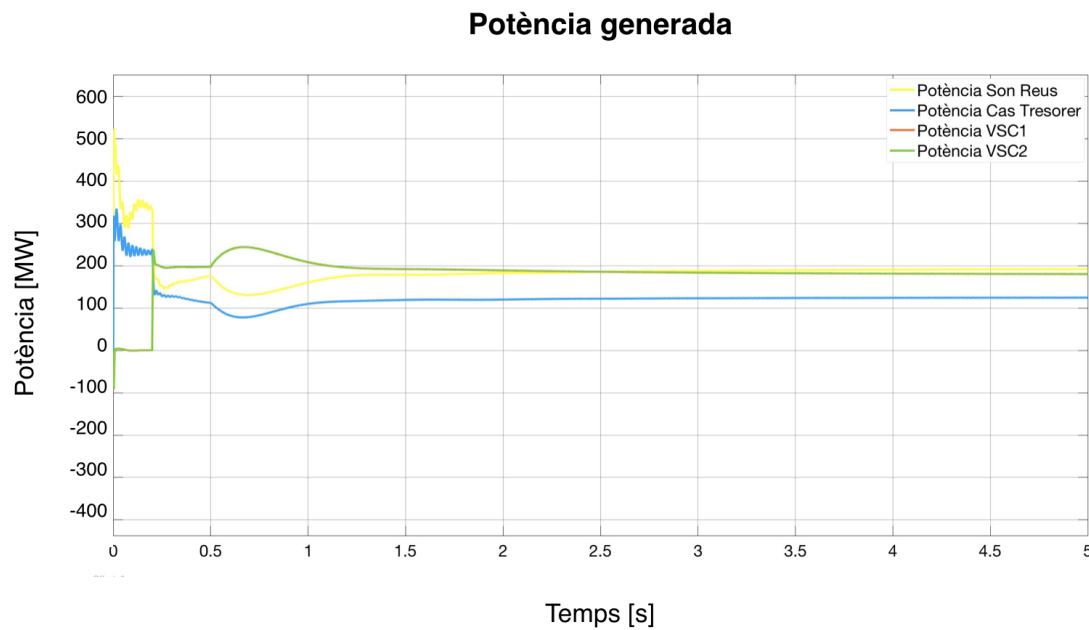


Figura 77: Increment de la potència subministrada pels dos VSC

## 6.5 Desconnexió de les centrals

En aquest apartat s'estudia el comportament del sistema al desconnectar cada una de les centrals elèctriques.

En les dues situacions, es desconnecta la central a la meitat de les simulacions. Com es veu a les Figures 79 i 81 a causa del control primari dissenyat, quan la potència generada per la central desconnectada passa a 0, aquesta diferencia de potència passa a ser generada per les altres dues màquines.

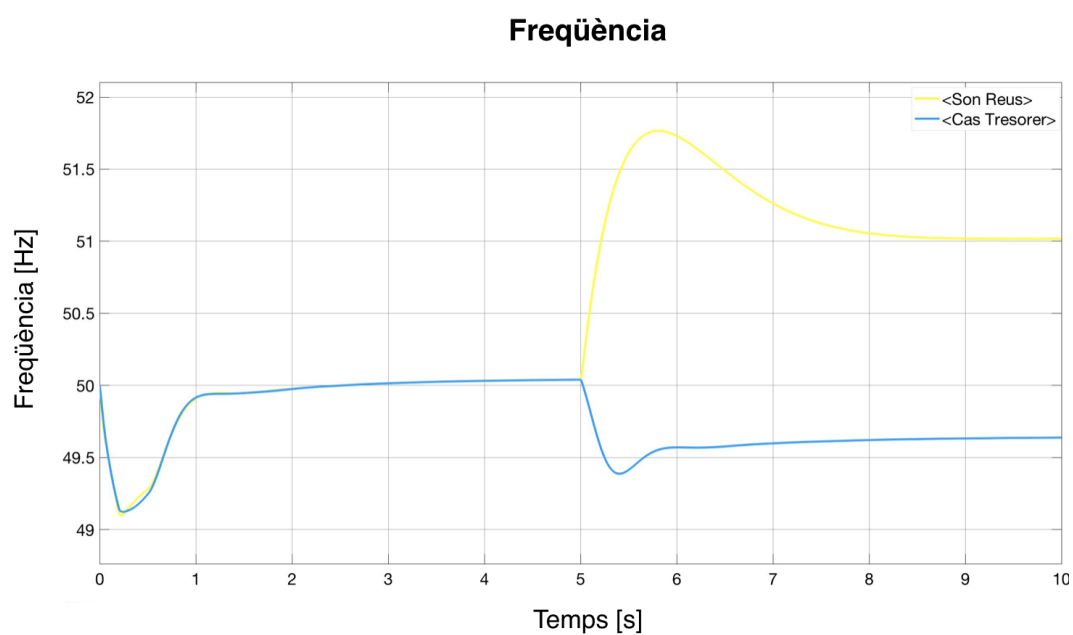


Figura 78: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus

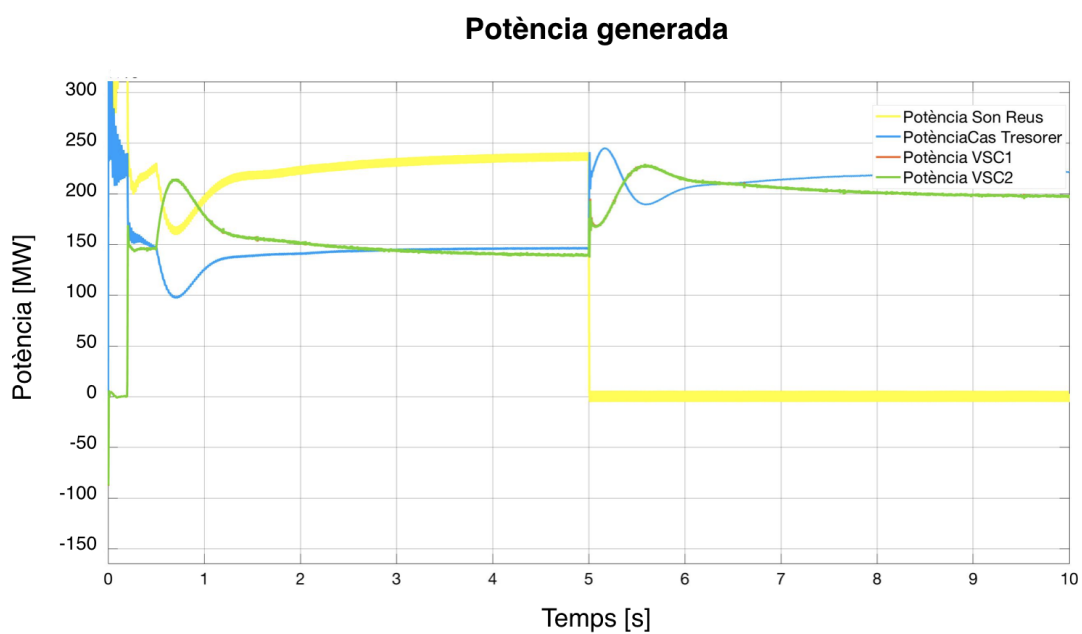


Figura 79: Comportament del sistema davant la desconexió de la central de Son Reus

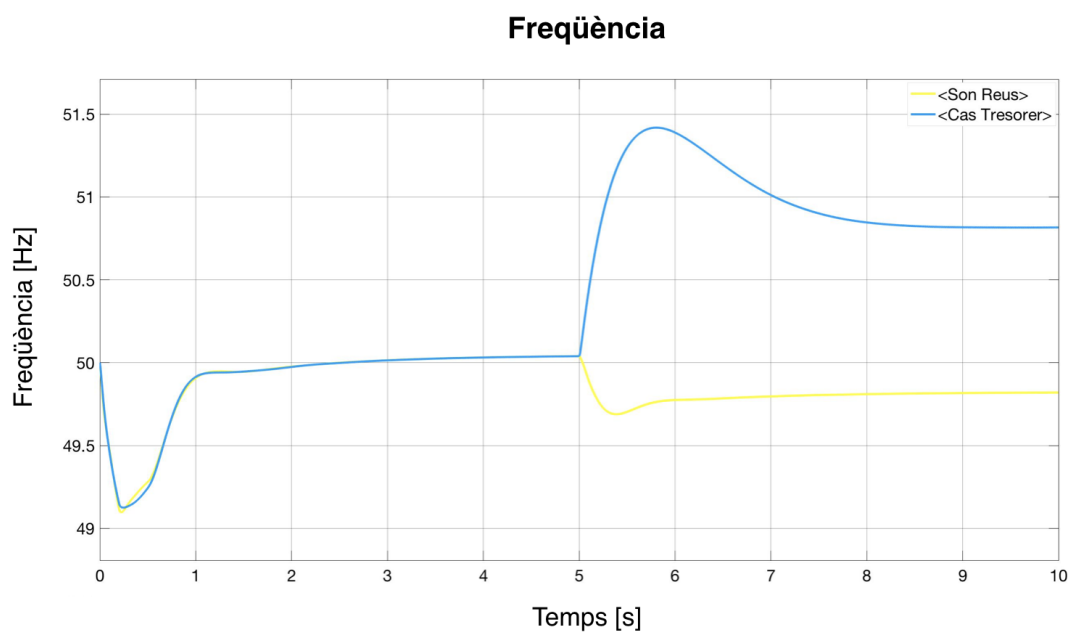


Figura 80: Comportament del sistema davant la desconnexió de la central de Cas Tresorer

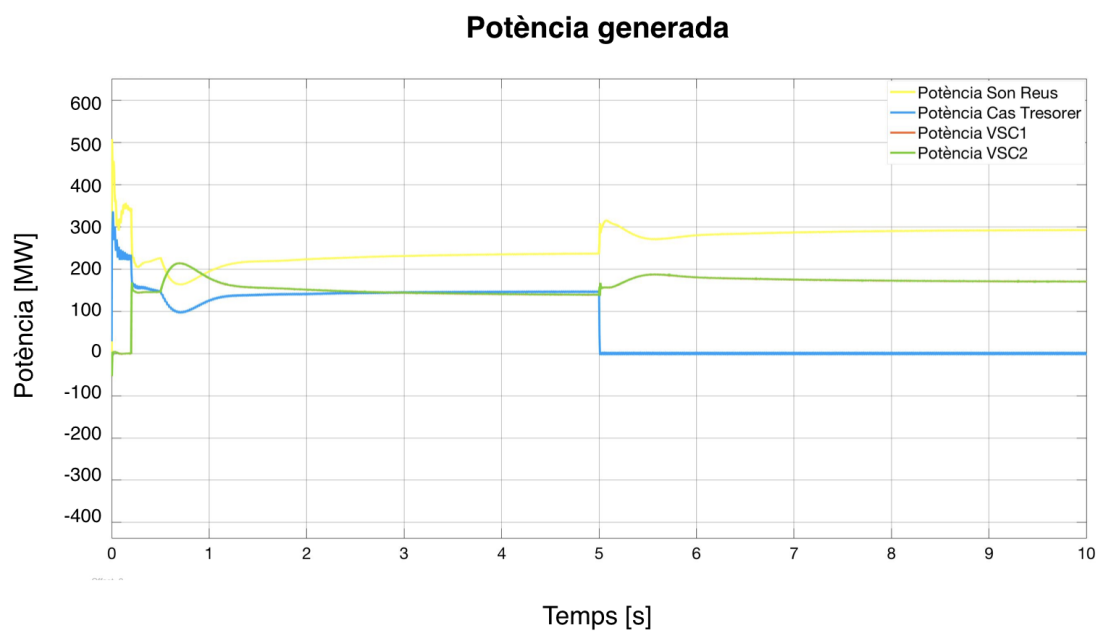


Figura 81: Comportament del sistema davant la desconnexió de la central de Cas Tresorer

## 6.6 Canvis en la $k$ del droop

Per acabar amb l'estudi d'aquest primer cas, es realitzen una serie de simulacions variant el valor de la  $k$  del droop. En les següents Figures de la 82 a la 85 es veu la estabilitat de la freqüència depenent del valor de la  $k$ . En els gràfics s'observa com a major valor de la  $k$  el sistema és més inestable i la caiguda de la velocitat a l'arracada és major. Com s'explica en el Capítol 4 en aquest treball per la resta de simulacions s'utilitza  $k=0,05$ .

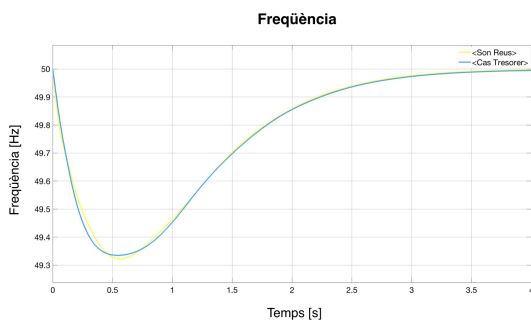


Figura 82:  $k=0,01$

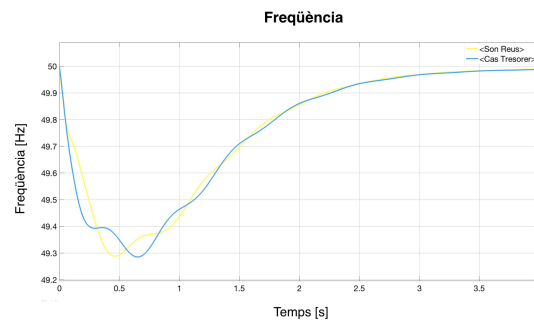


Figura 83:  $k=0,05$

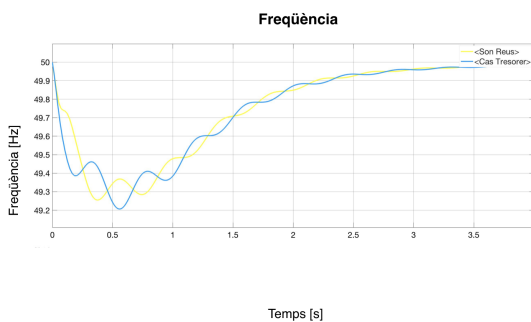


Figura 84:  $k=0,1$

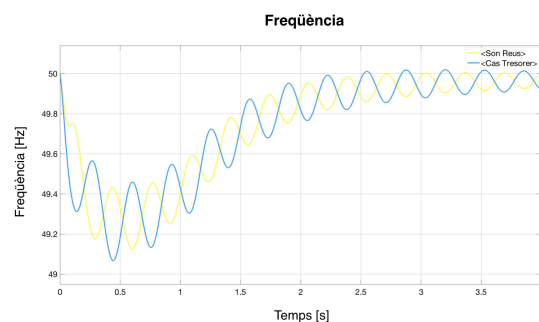


Figura 85:  $k=0,2$

## 6.7 Discussió dels resultats i observacions

Una vegada s'han realitzat els anàlisis de totes les situacions dels dos casos proposat a estudiar s'extreuen les principals conclusions. En primer lloc, a més aportació de la part síncrona del sistema, menor és la caiguda de la velocitat (freqüència) del sistema a l'arracada, degut a l'excitació a la major excitació del sistema. Aquest fet s'observa clarament, si es comparen les Figures del 5.1 i les del 6.1.

En segon lloc, es recalca la importació de la implementació del control primari, tant a les centrals (pel primer cas d'estudi), com al VSC (establert al 6.3). Sense aquest control, el sistema no estaria capacitat a reaccionar davant variacions de la demanda. Amb la implementació del control primari al VSC, el sistema guanya estabilitat tant a l'arrencada del sistema, on la  $\Delta f$  disminueix respecte la del sistema sense control, com davant les diferents pertorbacions que sofreix el sistema, on les caigudes i increments de velocitat del sistema són menors i conseqüentment proporciona una major estabilitat. A més, amb el control al VSC el sistema s'estabilitza més

ràpidament a la Figura 70 pràcticament en un segon ha arribat al valor nominal de la freqüència del sistema, mentre que sense el control en tarda aproximadament entre 3 i 4.



## 7 Conclusions

En aquest projecte s'ha presentat una metodologia per a realitzar l'anàlisi del comportament de la freqüència i de les potències subministrades per centrals elèctriques i enllaços HVDC davant diverses pertorbacions en un sistema elèctric de potència. En primer lloc, es presenta la modelització dels diferents elements que formen el sistema, de forma individual per tal de definir els paràmetres adients. En segon lloc, s'exposen els criteris de control elegits per posteriorment implementar-los a cada un dels elements utilitzats. Seguidament, s'analitza cada un dels elements que forma el sistema per separat amb l'objectiu d'aconseguir l'estabilitat permanent.

Una vegada s'ha dissenyat la metodologia, s'utilitza per analitzar dos sistemes, un amb tres centrals elèctriques i una connexió VSC, i l'altre, amb dues centrals i una segona interconnexió VSC. En aquests dos sistemes, s'han imposat uns intervals de freqüència i tensió per garantir un funcionament il·limitat del sistema i subministrar la potència demandada que s'han controlat a partir del control primari en la relació a potència-freqüència, dissenyat en el model.

El control primari de potència-freqüència, efectuat amb un controlador *droop* es comença implementant a les turbines de les centrals elèctriques per assegurar el subministrament elèctric davant canvis de demanda, generació i desconexió de centrals. Al analitzar el segon sistema, al desconnectar una de les centrals i canviar-la per un segon convertidor VSC es crea la necessitat d'implementar un altre controlador *droop* per implementar als VSC. D'aquesta manera l'estabilitat del sistema s'estableix abans i no sofreix tant davant les pertorbacions, com passa en el primer model.





## 8 Agraïments

Agraeixo en primer lloc al meu tutor Eduardo Prieto per la seva constant dedicació i suport al llarg del projecte.

Als meus amics i amigues per fer més lleugers aquests anys a la ETSEIB.

A tota la meva família, però en especial a la meva mare i a la meva germana Carme, per haver estat sempre al meu costat.



## 9 Pressupost

Per tal de poder calcular el pressupost total del projecte, es fa un recompte de tots els recursos utilitzats, com el cost de material d'oficina, les llicències necessàries, el cost energètic i el cost del personal.

### 9.1 Cost de material d'oficina

En relació als costos associats al material d'oficina, el treball es realitza principalment amb un ordinador portàtil model MacBook PRO 2018 que té un cost de 1.755,59 €, tenint en compte que aquest producte té una amortització i seguirà sent útil per futurs projectes, un 10% del seu preu es el cost destinat aquest projecte, com a proporció al temps dedicat a les simulacions amb MATLAB®.

Concepte	Preu Unitari	Amortització	Total
Ordenador portàtil	1.755,59 €	10%	175,56 €

Taula 16: Cost de material d'oficina

### 9.2 Cost de llicències

En relació al cost de la llicència, per la realització d'aquest projecte es necessita la de MATLAB amb el paquet de la llibreria *Simescape*. La llicència anual de MATLAB costa 800 € mentre que la permanent en costa 2000 €. Es decideix fer una inversió per poder fer més projectes en un futur. Per tant, per aquest projecte només es té en compte un 20 % del cost total de la llicència.

Concepte	Preu Unitari	Amortització	Total
Llicència MATLAB®	400€	20%	400 €

Taula 17: Cost de material de llicències

### 9.3 Cost de personal

En relació al cost de personal s'obté tenint en compte el preu per hora de la feina feta. Es fixa un valor de 20€/h, ja que per la realització d'aquest projecte es considera un salari una mica més elevat que un estudiant en pràctiques però menys que la d'un enginyer ja graduat.

Concepte	Preu/hora	Hores	Total
Investigació	20 €/h	50 h	1000 €
Modelització	20 €/h	50 h	1000 €
Control	20 €/h	100 h	2000 €
Simulacions	20 €/h	100 h	2000 €
Redacció	20 €/h	50 h	1000 €
<b>Total</b>		<b>350 h</b>	<b>7000 €</b>

Taula 18: Cost de personal

#### 9.4 Cost energètic

En relació al cost enèrgic es realitza una aproximació del que costa aquest projecte tenint en compte l'electricitat.

Concepte	Preu/hora	Hores	Total
Electricitat	0.03 €/h	350 h	10,5 €
<b>Total</b>			<b>10,5 €</b>

Taula 19: Cost de energètic

#### 9.5 Cost total associat

Es fa un balanç dels costos representats en les taules 16, 17, 18 i 19 i s'obté el total representat a la Taula 20.

Concepte	Total
Ordenador portàtil	175,56 €
Llicència MATLAB	400 €
Personal	7000 €
Electricitat	10,5 €
<b>Total</b>	<b>7586,06 €</b>

Taula 20: Cost total

## 10 Impacte ambiental

Encara que el projecte no es dugui a terme materialment i l'impacte ambiental sigui negligible, es realitza un petit estudi del que comportaria la implementació del segon cas analitzat, degut a que el primer cas es una modelització de la situació actual del sistema elèctric de l'illa i ja està implementat.

De forma resumida, el segon cas d'estudi respecte del primer comporta dues grans diferències: la desconexió de la central Es Murterar i la implementació d'un segon enllaç HDVC en el seu lloc.

En relació a la desconexió de la central de Es Murterar, les emissions de  $CO_2$  de les Illes Balears disminuirien considerablement. Un estudi realitzat per *el Instituto Internacional de Derecho y Medio Ambiente* [15] on es recullen les dades de les emissions de diòxid de carboni de la central, conclou que 2,36 milions de tones de  $CO_2$  afecten de forma directa al medi ambient, que es tradueix en el 68,5% de les emissions de  $CO_2$  relacionades amb la producció d'electricitat en les Balears i en el 27% de totes les emissions de  $CO_2$  que es produeixen a les Balears.

Pel que fa a la segona connexió HVDC, la implementació del mateix no proporcionaria un gran impacte ambiental, però si que s'haurien de tenir en compte els següents aspectes:

- Evitar que els cables passin per damunt jaciments arqueològics i per granges de piscicultura.
- Minimitzar l'impacte a la flora i la fauna protegida.
- Minimitzar l'impacte sobre la pesca.
- Minimitzar l'impacte sobre el sector turístic.

Un altre aspecte en tenir en compte és la protecció l'espècie endèmica del Mediterrani protegida a nivell europeu, coneguda com a posidònia. S'ha de respectar i garantir la seva conservació, es per això que el traçat dels cables s'ha d'elegir amb cura buscant la ruta més adient, com va fer l'empresa *Red Eléctrica de España* [6], amb el projecte *Rómulo* a 2011.



## Bibliografia

- [1] AGUSTÍ EGEA-ALVAREZ, ADRIÀ JUNYENT-FERRÉ AND ORIOL GOMIS-BELLMUNT, *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*  
Consultat (dates)
- [2] FERMÍN BARRERO, *Sistemas de energía eléctrica*
- [3] PALO LEDESMA, *Regulación de frecuencia y potencia*
- [4] ENDESA EDUCA, <https://www.endesaeduca.com/>
- [5] ANDERSSON, GÖRAN, *Power System Analysis Lecture*
- [6] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, *Interconexión eléctrica Península-Baleares. Proyecto Rómulo*
- [7] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, *Máquinas eléctricas de corriente alterna*
- [8] UNIVERSIDAD FI-UBA, *BOE-A-2018-2198*  
Control de las centrales eléctricas
- [9] MINISTERIO DE ENERGÍA, TURISMO Y AGENDA DIGITAL, *BOE-A-2018-2198*  
<http://www.boe.es>
- [10] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, <https://www.ree.es/es>
- [11] RAMÓN M. MUJAL, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*
- [12] ENDESA, <https://www.endesa.com>
- [13] MICROSEMI, *Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementations User Guide*
- [14] NATURGY, <https://www.naturgy.es/es>
- [15] INSTITUTO INTERNACIONAL DE DERECHO Y MEDIO AMBIENTE, <http://iidma.org/wp-content/uploads/2018/01/NP-Alcudia.pdf>





## A Annex

### A.1 Disseny del convertidor VSC

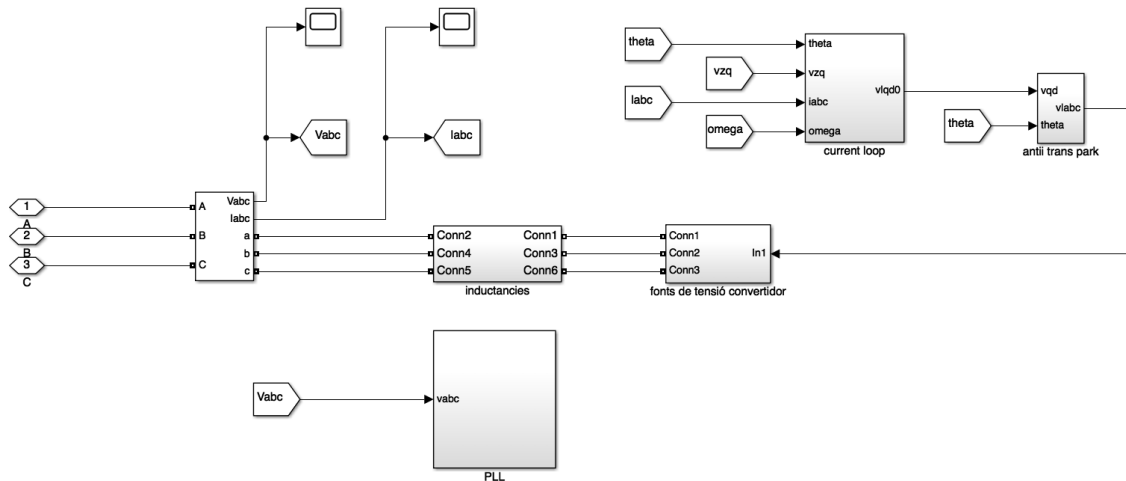


Figura 86: Disseny del VSC

#### A.1.1 PLL

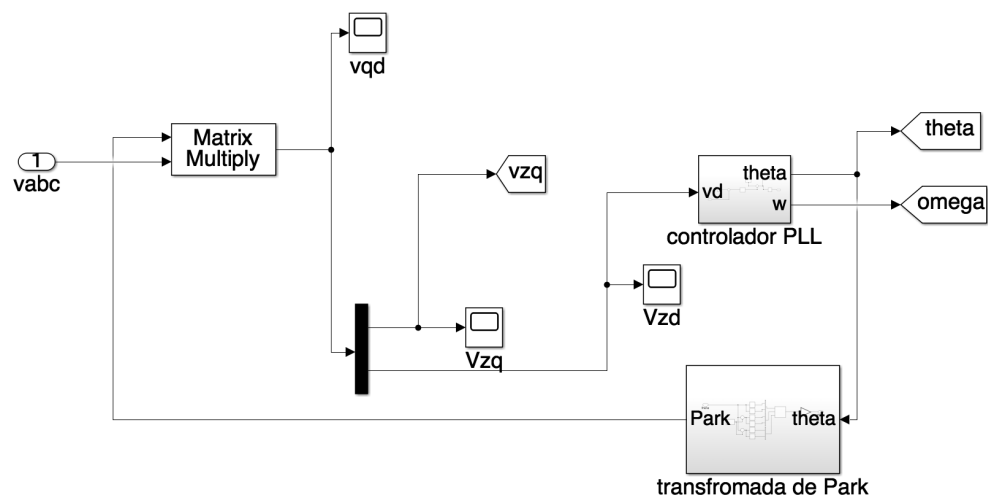


Figura 87: PLL

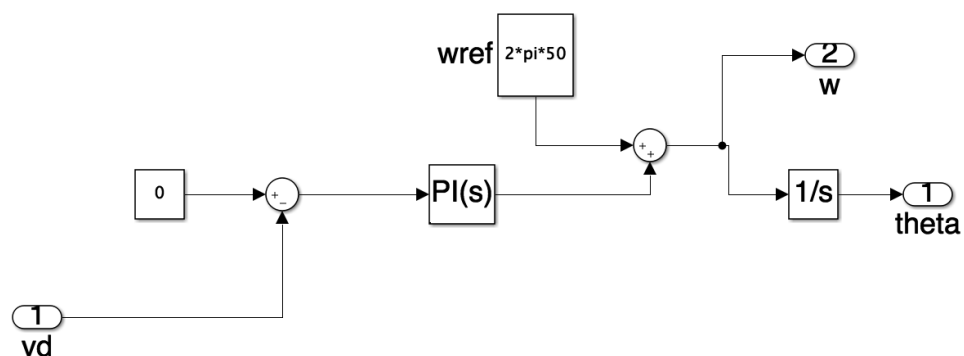


Figura 88: Controlador PLL

### A.1.2 Current loop

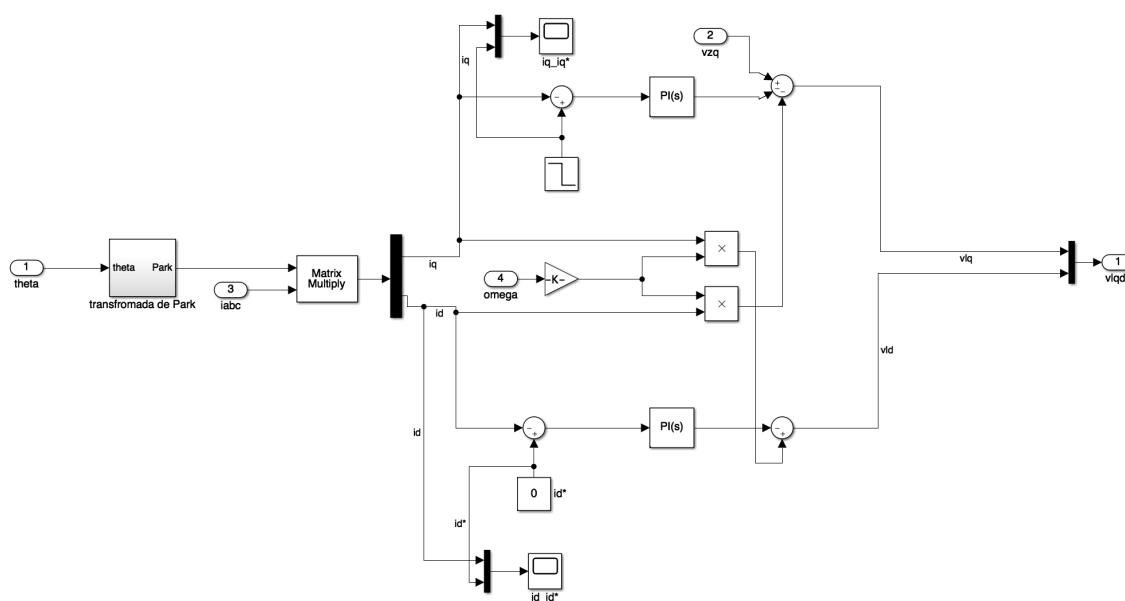


Figura 89: Current loop

### A.1.3 Controlador *droop* del VSC

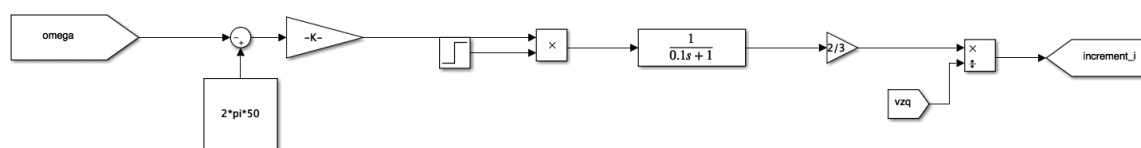


Figura 90: Controlador *droop* del VSC

### A.1.4 Transformada de Park

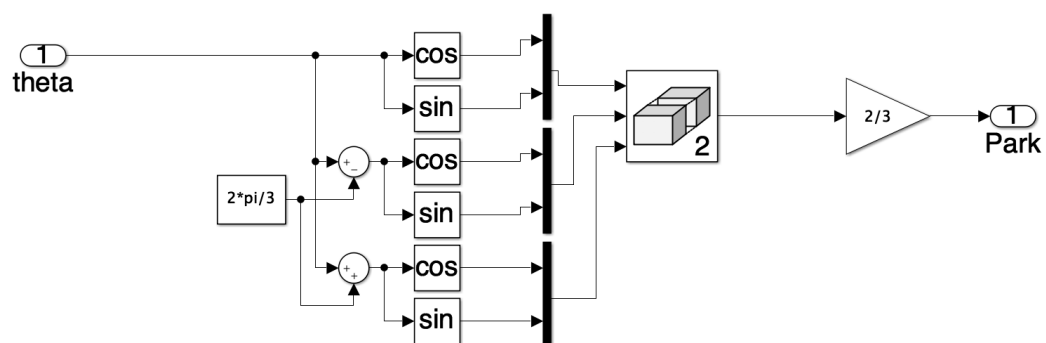


Figura 91: Transformada de Park

### A.1.5 Antitransformada de Park

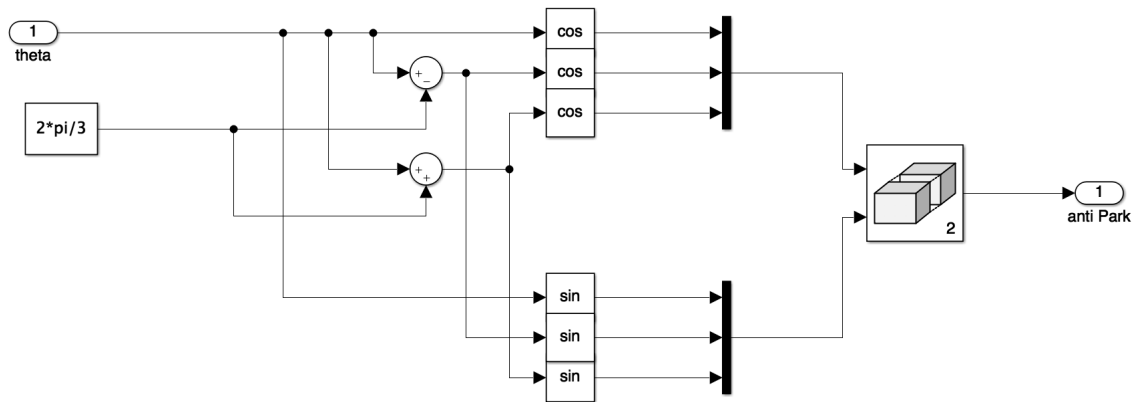


Figura 92: Antitransformada de Park

## A.2 Disseny de les centrals elèctriques

### A.2.1 Son Reus

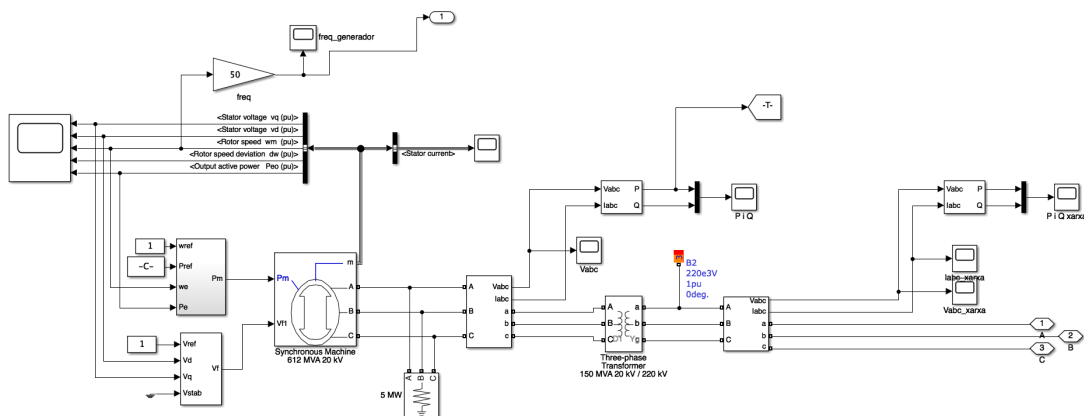


Figura 93: Disseny central de Son Reus

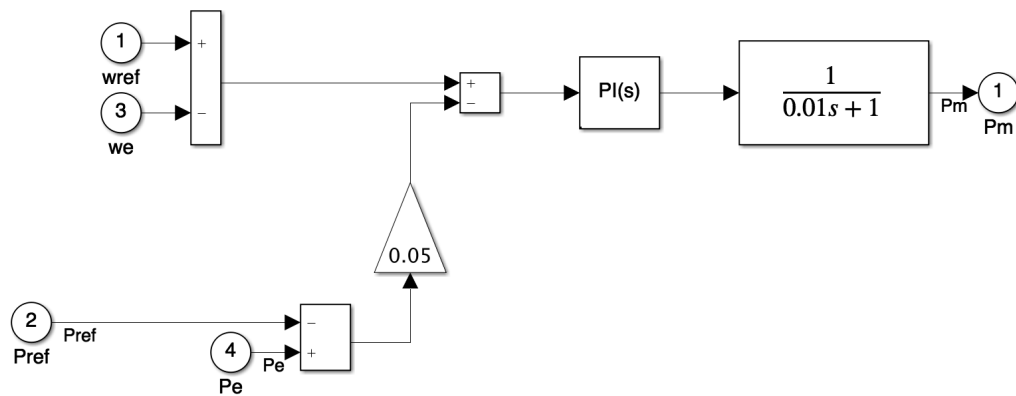


Figura 94: Disseny turbina de la central de Son Reus

### A.2.2 Cas Tresorer

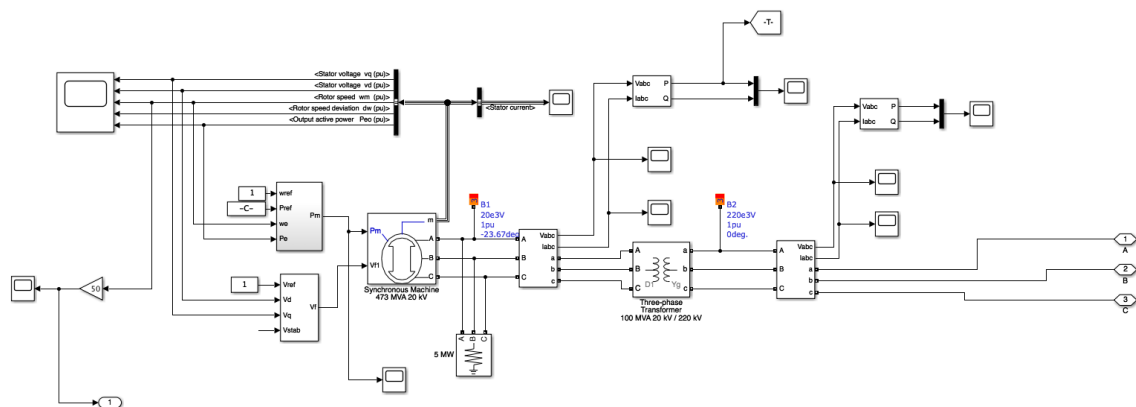


Figura 95: Disseny central de Cas Tresorer

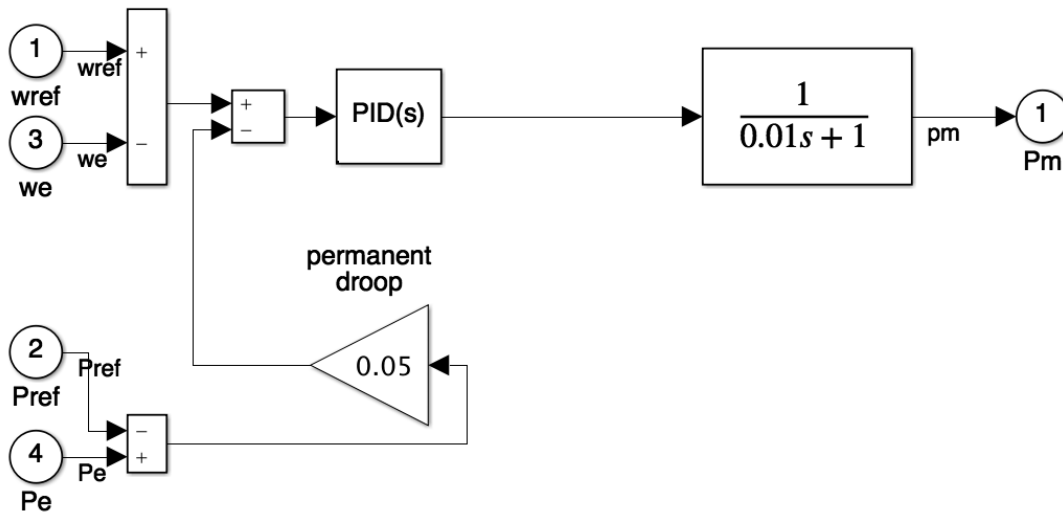


Figura 96: Disseny turbina de la central de Cas Tresorer

### A.2.3 Es Murterar

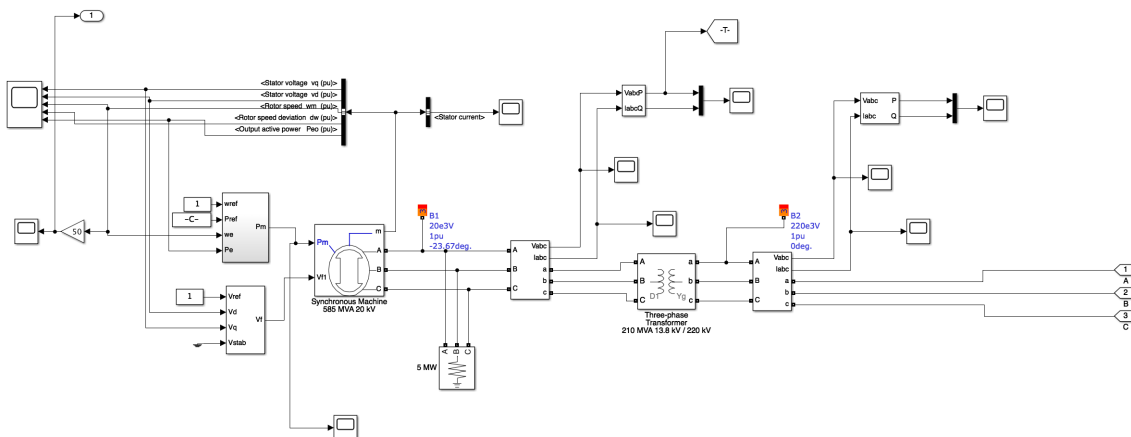


Figura 97: Disseny central de Es Murterar

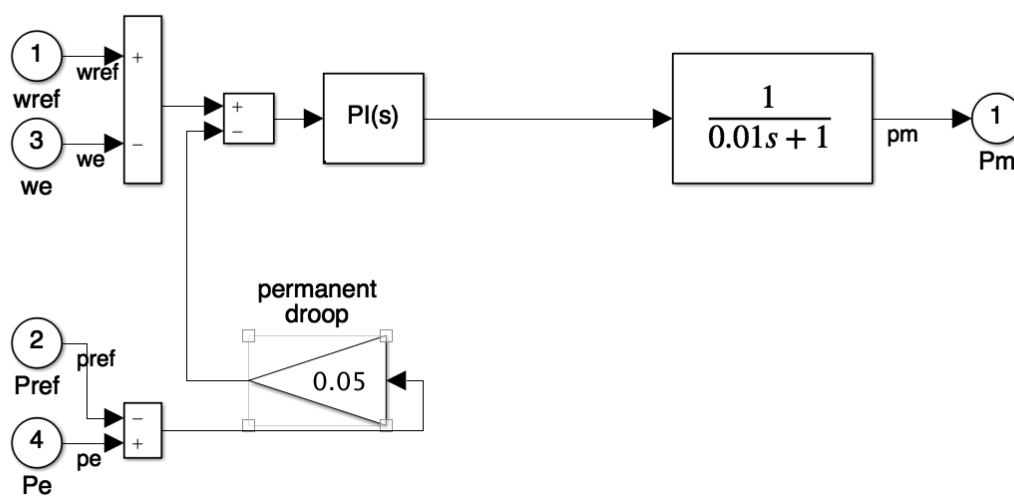


Figura 98: Disseny turbina de la central de Es Murterar